

**Thermoregulatorische Größen
in Abhängigkeit
von Tageszeit und Menstruationszyklus**

Thomas H. Schmidt

1972

Aus dem Max-Plank-Institut für Verhaltensphysiologie
in Erling-Andechs. Direktor: Prof.Dr.J.Aschoff

Thermoregulatorische Größen in Abhängigkeit von Tageszeit
und Menstruationszyklus

Inaugural - Dissertation
zur Erlangung der Doktorwürde
in der gesamten Medizin
und einer hohen Medizinischen Fakultät
der Ludwig-Maximilians-Universität
zu München

vorgelegt von
Thomas H. Schmidt
aus Stendal

München
1972



Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät
der Universität München

Berichterstatter:	Prof. Dr. J. Aschoff
Mitberichterstatter:	Prof. Dr. K. Kramer
Dekan:	Prof. Dr. W. Spann
Tag der mündlichen Prüfung: 4. 12. 1972	

Herrn Professor Dr.med. J. Aschoff möchte ich für seine großzügige Unterstützung und kritische Diskussion dieser Arbeit sehr herzlich danken.

Herrn Ch. Aschoff sei für Ausarbeitung und Bereitstellung von Programmen für die elektronische Datenverarbeitung gedankt.

Darüberhinaus gilt mein Dank Herrn Dr. M. McCally für seine anregende Kritik und Hilfe bei der statistischen Auswertung.

Inhaltsverzeichnis	Seite
1. <u>Einleitung</u>	8
2. <u>Methodik</u>	10
2.1. Versuchspersonen, Meßgrößen und Meßstellen	10
2.2. Versuchsbedingungen	11
2.3. Auswertung	13
3. <u>Ergebnisse</u>	14
3.1. Rektaltemperatur	14
3.2. Hauttemperatur	16
3.3. O ₂ -Verbrauch, CO ₂ -Ausscheidung und respiratorischer Quotient	20
3.4. Wärmebildung, Wärmeabgabe und Wärmedurchgangszahl	22
3.5. Tagesgang der Kerntemperatur als Funktion von Wärmebildung und Wärmeabgabe	23
3.6. Vergleich verschiedener Körperstellen	32
4. <u>Diskussion</u>	37
4.1. Kern- und Hauttemperaturen	37
4.2. Bilanz im Zyklus und im Tagesgang	38
4.3. Tagesperiodik thermoregulatorischer Größen	40
4.4. Vergleich thermoregulatorischer Funktionen verschiedener Körperstellen in Tagesgang und Zyklus	41
4.5. Überlegungen zur tagesperiodischen Organisation der Temperaturregulation	44

	Seite
5. <u>Zusammenfassung</u>	47
5.1. Prae-/postovulatorische Unterschiede im 24-Stunden-Mittel	47
5.2. Tagesgang, Schwingungsbreite bzw. Amplitude und Phasenlage	49
6. <u>Literaturverzeichnis</u>	52
7. <u>Lebenslauf</u>	56

Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen

1	Zehe
2	Fußrücken
3	Unterschenkel
4	Oberschenkel
5	Bauch
6	Brust
7	Stirn
8	Oberarm
9	Unterarm
10	Handrücken
11	Finger
Amp.	Amplitude
D	Differenz zwischen Rektal- und Hauttemperatur
DT	Änderung der Rektaltemperatur pro 30 Minuten
H	Hauttemperatur
HM	mittlere Hauttemperatur
nach	postovulatorisch
PPU	prae-/postovulatorischer Unterschied
R	Rektaltemperatur
RQ	respiratorischer Quotient
U	Wärmeübergangszahl
UM	mittlere Wärmeübergangszahl
vor	praeovulatorisch
$\dot{V}CO_2$	Kohlendioxidausscheidung pro Zeiteinheit
$\dot{V}O_2$	Sauerstoffverbrauch pro Zeiteinheit
W	Wärmestromdichte
WA	Wärmeabgabe
WA_A	Abweichung der Wärmeabgabe vom 24-Stunden-Mittel
WB	Wärmebildung
WB_A	Abweichung der Wärmebildung vom 24-Stunden-Mittel
Z	Wärmedurchgangszahl
ZM	mittlere Wärmedurchgangszahl



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41553803_0089

1. Einleitung

Die circadiane Periodik stellt eine im Laufe der Evolution erworbene Adaptation der Organismen an die zeitliche Struktur der Umwelt dar (10). Ihre Ursache ist in endogenen rhythmischen Prozessen zu suchen, die auch ohne Anstoß von außen ablaufen (8, 9, 26, 30). Beim Menschen gehört der Tagesgang der Körpertemperatur zu den am häufigsten untersuchten Funktionen (s. Übersicht 2; 13).

Weniger Untersuchungen liegen vor über die den Tagesgang der Körpertemperatur bestimmenden Faktoren, den Mechanismen der Wärmebildung und Wärmeabgabe. Periodische Änderungen des Energiestoffwechsels wurden selten als eigenständige Rhythmen beschrieben, häufiger als abhängig von anderen Faktoren wie Nahrungsaufnahme und Aktivität. In neuerer Zeit wurde der circadiane Charakter der Rhythmen des Sauerstoffverbrauchs als teilweise unabhängig von Nahrungsaufnahme und Aktivität nachgewiesen (14). Tagesperiodische Änderungen von Hauttemperatur, Wärmedurchgangszahl und Wärmestromdichte an verschiedenen Körperstellen wurden ebenfalls untersucht (4, 11, 27). Trotzdem ist wenig bekannt über das Ausmaß der Beteiligung von Wärmebildung und Wärmeabgabe am Tagesgang der Körpertemperatur (13, 15).

Die rhythmischen Änderungen der Basaltemperatur der geschlechtsreifen Frau in Abhängigkeit von Ovulation und Menstruation sind seit längerem nachgewiesen (s. Übersicht 23). Als ihre Ursache wird die vermehrte Progesteronproduktion in der 2. Zyklushälfte angesehen (21, 23, 24). Auch hier ist über die Beteiligung der einzelnen temperaturregulatorischen Mechanismen wenig und widersprüchliches bekannt (s. Übersicht 23; 1, 18, 19, 31).

Theoretisch ist die Annahme verschiedener Regulationsvorgänge für die postovulatorische Erhöhung der Basaltemperatur möglich:

- a) Ist die Wärmebildung unverändert, so kann der erhöhten Kerntemperatur nur eine Verringerung der Wärmedurchgangszahl (5) zugrunde liegen; denn die Wärmedurchgangszahl, der Quotient aus Wärmeabgabe und der Differenz Kern- minus mittlerer Hauttemperatur, bestimmt neben dem äußeren Temperaturgefälle zwischen Haut und Umgebung die Bedingungen für die Wärmeabgabe. Wenn Wärmebildung und Wärmeabgabe im Gleichgewichtszustand sind, darf sich in diesem Fall am äußeren Temperaturgefälle nichts ändern; die Differenz zwischen Kern und mittlerer Hauttemperatur muß sich jedoch vergrößern.
- b) Ist die Wärmebildung erhöht, so ergibt sich eine erhöhte Kerntemperatur bei gleichbleibender oder nur unzureichend erhöhter Wärmedurchgangszahl. Dabei ist zu berücksichtigen, daß im Fall der erhöhten Wärmebildung bei unveränderten äußeren Wärmeübergangsbedingungen das Temperaturgefälle zwischen Haut und Umgebung steigt.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich zum einen mit den Zusammenhängen zwischen Wärmebildung, Wärmeabgabe, Wärmedurchgangszahl und Körpertemperatur im Hinblick auf ihren im 24-Stunden-Rhythmus synchronisierten tagesperiodischen Ablauf. Zum anderen wird der Einfluß des weiblichen Ovulationszyklus auf Mechanismen der Temperaturregulation untersucht, insbesondere auch in Bezug auf die Parameter der circadianen Periodik: Gleichwert, Amplitude und Phasenlage.

2. Methodik

2.1. Versuchspersonen, Meßgrößen und Meßstellen

Acht gesunde weibliche Versuchspersonen im Alter zwischen 22 und 26 Jahren waren zweimal während des Menstruationszyklus über jeweils 28 Stunden im Versuch. Ein Versuch lag in der praeovulatorischen Phase, der andere in der post-ovulatorischen Phase. Folgende Meßgrößen wurden bestimmt:

Sauerstoff-Verbrauch ($\dot{V}O_2$) und Kohlendioxid-Ausscheidung ($\dot{V}CO_2$) in ml/min kg Körpergewicht für jeweils 50 Minuten pro Stunde mit einem offenen System (Noyons-Diaferometer der Firma Kipp & Zonen) und fortlaufender Registrierung (Mikrograph). Daraus ließen sich Wärmebildung (WB) in $\text{mcal/cm}^2\text{min}$ nach einer Formel für kalorische Werte von Rubner (20, 22) und der respiratorische Quotient (RQ) errechnen. Außerdem wurden fortlaufend Rektaltemperatur (R) in $^{\circ}\text{C}$, Wärmestromdichten auf der Haut (W) in $\text{mcal/cm}^2\text{min}$, sowie die Differenzen Rektal- minus Hauttemperatur (D) in $^{\circ}\text{C}$ an 11 verschiedenen Stellen der Körperoberfläche gemessen und daraus für die betreffenden Körperstellen Hauttemperaturen $\overline{H} = R - D$ in $^{\circ}\text{C}$, sowie Wärmedurchgangszahlen $\overline{Z} = W/D$ und Wärmeübergangszahlen $\overline{U} = W/(H - \text{Umgebungstemperatur})$ in $\text{mcal/cm}^2\text{min}^{\circ}\text{C}$ berechnet. Zur Messung von W und D dienten kleine Kupfer-Konstantan-Gradienten-Kalorimeter (3), zur Bestimmung von R ebenfalls ein Kupfer-Konstantan-Element in Verbindung mit einem Thermostaten von konstanter Temperatur. Diese Meßgrößen wurden verstärkt und auf Papierstreifen mit Mehrkanalschreibern registriert.

Wärmestromdichten und Temperaturdifferenzen wurden an folgenden Hautstellen der rechten Körperhälfte gemessen:

(1): Zehe (Mittelphalanx des zweiten Zehenrückens);

(2): Fußrücken (Mitte); (3): Unterschenkel (2 cm lateral von der Mitte der Tibiakante); (4): Oberschenkel (Mitte, vorne); (5): Bauch (am Unterrand des rechten Rippenbogens, Medioclavicularlinie); (6): Brust (3. Rippe Medioclavicularlinie); (7): Stirn (Mitte); (8): Oberarm (Ansatz des musculus Deltoideus); (9): Unterarm (Mitte, radial, auf musculus brachioradialis); (10): Handrücken (Mitte); (11): Finger (Rücken der Mittelphalanx des dritten Fingers).

2.2. Versuchsbedingungen

Die Versuchspersonen hielten sich für die Dauer des Versuches zweimal im Abstand von etwa 8 bis 12 Tagen von jeweils 7.30 Uhr bis zum darauf folgenden Tag um 11.30 Uhr in einer Klimakammer (Breite: 190, Länge: 315, Höhe: 224 cm) bei $28 (\pm 0.1)^{\circ}\text{C}$ und 50 % (± 5 %) relativer Luftfeuchtigkeit auf.

Der erste Versuch fand jeweils 5 bis 1 Tag vor Menstruationsbeginn statt - nachdem durch kontinuierliche morgendliche Basaltemperaturmessung die Ovulation nachgewiesen war; das Ergebnis dieses Versuches ist im folgenden mit "nach" bezeichnet. Der zweite Versuch wurde nach Beendigung der darauffolgenden Menstruation, zwischen 5. und 9. Tag des nächsten Zyklus durchgeführt; das Ergebnis dieses Versuches ist mit "vor" bezeichnet.

Am Vortag jedes Versuches aßen und tranken die Versuchspersonen jeweils zur gleichen Zeit das Gleiche. Während des Versuches lagen sie auf einem Bett, nur mit einem Bikini bekleidet. Der Kopf befand sich unter einer locker am Hals adaptierten Plexiglashaube, durch die für die Stoffwechselmessung 49 l Luft pro Minute aus der Umgebung gesaugt wurden. Der übrige Körper war unbedeckt (Abb. 1).

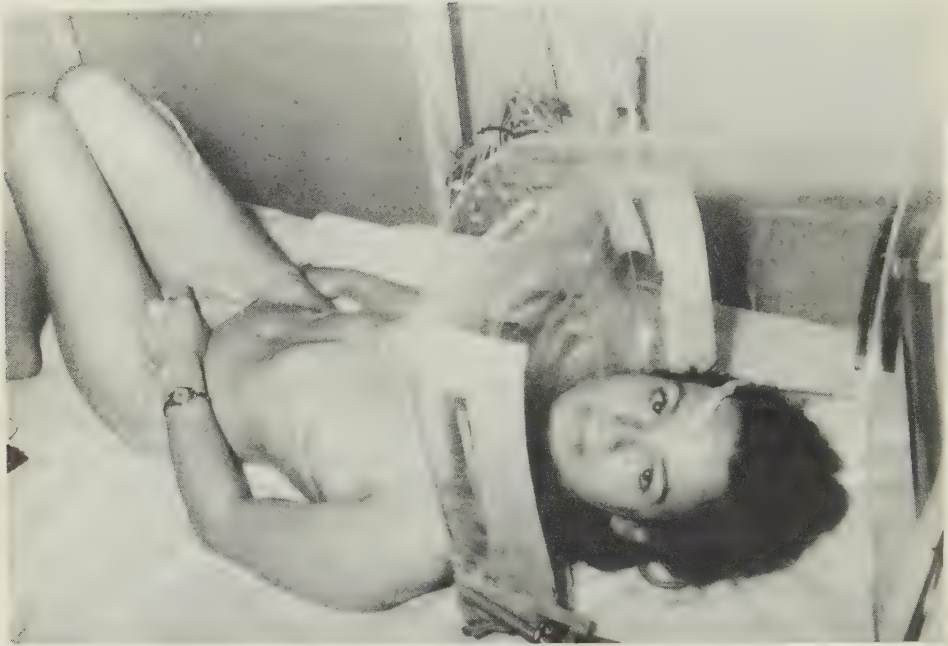


Abb. 1 Versuchsperson während des Versuches in der Klimakammer. Der Kopf befindet sich unter einer locker am Hals adaptierten Plexiglashaube, durch die zur Messung von $\dot{V}O_2$ und $\dot{V}CO_2$ kontinuierlich 49 l Luft pro Minute aus der Umgebung gesaugt werden. Das Diaferometer vergleicht O_2 - und CO_2 -Gehalt der Haubenluft mit der Umgebungsluft. An Stirn und Oberschenkel sind die Gradienten-Kalorimeter zu sehen.

Alle 2 Stunden standen die Versuchspersonen auf, tranken 100 ml aqua dest. von 28°C und wurden nach Miktion gewogen, nahmen aber keine Nahrung zu sich. Bei strenger Bettruhe während der übrigen Zeit konnten die Versuchspersonen durch die Plexiglashaube lesen. Zwischen 21.30 Uhr nach dem letzten Aufstehen konnten sie bei gelöschtem Licht bis 7.30 Uhr zum ersten morgendlichen Aufstehen schlafen.

2.3. Auswertung

Die temperaturregulatorischen Größen R, W und D wurden in Halbstunden-Intervallen von den Registrierungen abgelesen. Für VO_2 und VCO_2 wurden wegen größerer kurzfristiger Schwankungen aus jeweils zehn 2 1/2 Minuten-Ablesungen Halbstunden-Mittelwerte errechnet. Die 24-Stunden-Mittel wurden hiervon jeweils zwischen 11.30 und 11.00 Uhr am folgenden Tag gebildet.

Die Daten wurden statistisch mit der mehrfachen Varianzanalyse ausgewertet und Signifikanzen für Unterschiede im Tagesmittel zwischen den praeovulatorischen und postovulatorischen Meßwerten - dem prae-/postovulatorischen Unterschied (PPU) - berechnet. Zur Bestimmung der Phasenlage und der Amplitude wurde die Harmonische Analyse (32) benutzt unter Annahme einer Periode von 24 Stunden. Die statistische Sicherung von Unterschieden in Phasenlage und Amplitude wurde mit dem T-Test für die Differenz der Mittelwerte aus verbundenen Stichproben vorgenommen.

3. Ergebnisse

3.1. Rektaltemperatur

Abb. 2 zeigt den Tagesgang der Rektaltemperatur als Mittel von 8 Versuchspersonen und die interindividuelle Streuung (Standardabweichung) vor der Ovulation (linkes Diagramm) und nach der Ovulation (rechtes Diagramm). Als dünne horizontale Linien sind eingezeichnet Maximum, Minimum und das 24-Stunden-Mittel, jeweils von den Halbstundenwerten zwischen 11.30 und 11.00 Uhr am folgenden Tag gebildet.

Der prae-/postovulatorische Unterschied (PPU) im 24-Stunden-Mittel beträgt 0.31°C ($p < 0.001$). Der prae-ovulatorische Wert (vor) liegt bei 36.71°C , der post-ovulatorische (nach) bei 37.02°C .

Zum Zeitpunkt, an dem üblicherweise zur Bestimmung der Ovulation morgens die Basaltemperatur gemessen wird, liegt die Kerntemperatur sowohl prae- wie postovulatorisch nahe diesem Tagesmittel. Jedoch verlaufen die prae- und die postovulatorischen Kurven nicht parallel. Der geringste Abstand zwischen ihnen liegt mit 0.22°C bei 15.30 Uhr, der größte mit 0.43°C bei 2.30 Uhr. Diesem unterschiedlichen Verlauf entsprechen Unterschiede in der Schwingungsbreite, d.h. in der Differenz zwischen Maximum und Minimum. Sie beträgt praeovulatorisch 0.69°C und 0.58°C postovulatorisch. Dieser Unterschied von 0.11°C wird fast ausschließlich durch das tiefere nächtliche Absinken der Körpertemperatur in der praeovulatorischen Phase hervorgerufen. Tagesmittel minus Minimum (= negativer Scheitelwert) ist hier mit 0.45°C bereits $1/10^{\circ}$ größer als postovulatorisch mit 0.35°C .

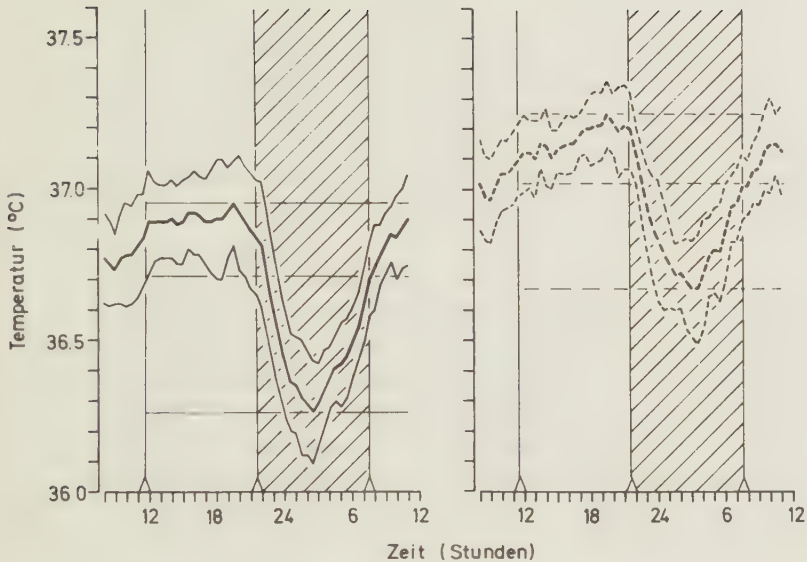


Abb. 2 Tagesgang der mittleren Rektaltemperatur (R) von 8 Versuchspersonen vor (linkes Diagramm, ausgezogene dicke Linie) und nach der Ovulation (rechtes Diagramm, gestrichelte dicke Linie) sowie deren inter-individuelle Streuung (= Standardabweichung) (dünne ausgezogene bzw. gestrichelte Linien) in 30 Minuten-Intervallen. Die horizontalen Linien entsprechen Maximum, 24-Stunden-Mittel und Minimum. Die erste senkrechte Linie gibt den Beginn der Mittelung über 24 Stunden an. Die senkrechten schraffierten Säulen markieren die Schlafzeiten.

Maximum minus Tagesmittel (= positiver Scheitelwert) unterscheidet sich bei beiden nur um $1/100^{\circ}$: vor = 0.24°C ; nach = 0.23°C . Berechnet man mit Hilfe der Harmonischen Analyse die Amplituden (= halbe Schwingungsbreite) der sinusförmigen Grundschiwingung der prae- und der post-ovulatorischen Kurve, so ergibt sich ein nach dem T-Test signifikanter Unterschied von 0.075°C (vor = 0.29°C ; nach = 0.22°C ; $0.01 < p < 0.02$).

Das Maximum der über alle Versuchspersonen gemittelten Kurve liegt prae- und postovulatorisch bei 19.30 Uhr. Das Minimum ist praeovulatorisch im Mittel bei 2.30 Uhr, 0.56 Stunden vor dem postovulatorischen Minimum; dieser Unterschied ist nicht deutlich signifikant ($0.05 < p < 0.1$). Der auch in den Grundschiwingungen angedeutete Unterschied der Phasenlagen (0.64 Stunden) läßt sich ebenfalls statistisch nicht sichern ($0.1 < p < 0.2$).

3.2. Hauttemperatur

In Abb. 3 sind die 24-Stunden-Mittel der Hauttemperaturen an 11 verschiedenen Körperstellen dargestellt. Die größten Unterschiede in diesem Temperaturenprofil - zwischen Zehe (1) und Stirn (7) - betragen etwa 4°C . Hierbei ist allerdings zu berücksichtigen, daß sich der Kopf in einer wärmeren Umgebung als der übrige Körper befindet. Der Wärmeaustausch mit der Umgebung ist durch die Plexiglashaube behindert, die Wärmeabgabe durch die Atmung aber vermehrt. Deswegen treten in der Haube Temperaturen über 28°C auf.

Die nächst größten Unterschiede - zwischen Zehe (1) und Bauch (5) bzw. Brust (6) - betragen etwa 3°C . Verfolgt man die Temperaturen systematisch von der Peripherie zum

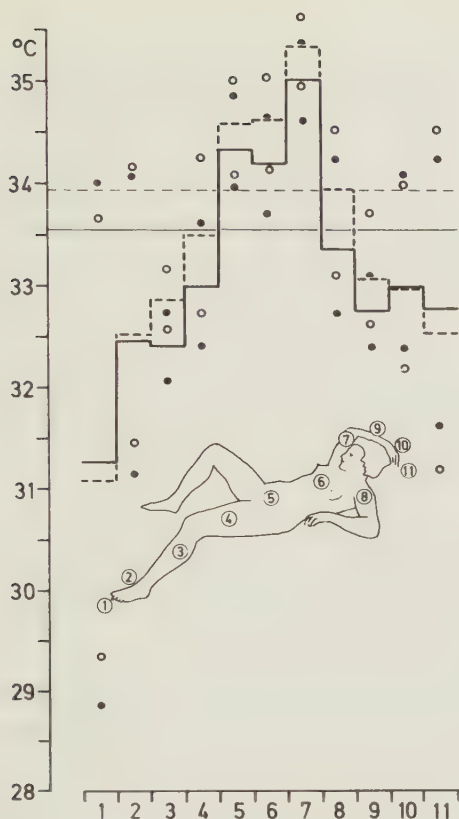


Abb. 3 Profil der 24-Stunden-Mittel von Hauttemperaturen (Mittel der 8 Versuchspersonen) vor (ausgezogene Linien) und nach der Ovulation (gestrichelte Linien) an 11 verschiedenen Körperstellen. Mit horizontal durchgezogenen Linien dargestellt sind die mittleren Hauttemperaturen (HM). Die kleinen Kreise geben Maximum und Minimum des tagesperiodischen Verlaufes wieder, prae-ovulatorisch ausgefüllt •, postovulatorisch nicht ausgefüllt ○. Die Zahlen 1-11 auf der Abszisse korrespondieren mit den entsprechenden Körperstellen auf der liegenden Figur (nach "Schlafende Venus" von N. Poussin, 1593-1665) und geben die Meßstellen der Hauttemperaturen wieder (s. Text unter 2.1., S.3.).

Rumpf, - z.B. von der Zehe ⁽¹⁾, der kältesten hier gemessenen Körperstelle, über Fußbrücken ⁽²⁾, Unterschenkel ⁽³⁾, Oberschenkel ⁽⁴⁾ zu Bauch ⁽⁵⁾, Brust ⁽⁶⁾ und Stirn ⁽⁷⁾ - erkennt man einen mehr oder weniger kontinuierlichen Anstieg. Auch an der oberen Extremität ⁽⁸⁻¹¹⁾ findet sich dieser Temperaturanstieg von der Peripherie zum Rumpf (Abb. 3, von rechts nach links). Das entspricht der Regel, nach der die Hauttemperatur desto tiefer liegt, je weiter zum einen das Oberflächengebiet vom wärmebildenden Kern entfernt und zum anderen je kleiner der Radius der annähernd zylindrischen Körperteile ist (4, 16). Die obere Extremität (rechte Seite, Abb. 3) ist insgesamt wärmer als die untere (linke Seite, Abb. 3).

Die tagesperiodische Schwingungsbreite, ersichtlich aus dem Abstand der durch Punkte angedeuteten Maxima und Minima, zeigt beträchtliche Unterschiede an den verschiedenen Körperstellen. Sie ist an den Extremitätenenden am größten (Zehe rund 5° , Fuß und Finger 3°C , Hand 2°C), an den übrigen Körperstellen geringer (Unterschenkel und Stirn etwa 0.7°C , Unterarm, Brust und Bauch 1°C , Oberarm und Oberschenkel 1.5°C). Daraus geht hervor, daß das Temperaturprofil zu verschiedenen Tageszeiten einen unterschiedlichen Verlauf hat, zumal Maxima und Minima an den einzelnen Körperstellen zu verschiedenen Zeiten auftreten.

Die Maxima der Hauttemperaturen an den Extremitätenenden liegen in den frühen Nachtstunden, die Minima am Nachmittag. An den übrigen Stellen, die noch einen ausgeprägten Tagesgang erkennen lassen, wie Stirn, Brust und Bauch, liegen die Maxima etwa 3 Stunden früher, die Minima in der 2. Nachthälfte. Oberschenkel- und Oberarmtemperaturen zeigen ungefähr die gleiche Phasenlage, sind jedoch von einem ansteigenden Trend während der Dauer des Experimentes überlagert, sodaß Minima am Vormittag vorgetauscht werden. An Unterschenkel und Unterarm ist kein Tagesgang der Hauttemperaturen zu sehen.

Auch während des Ovulationszyklus läßt sich unterschiedliches Verhalten im 24-Stunden-Mittel der Hauttemperaturen an den einzelnen Körperstellen nachweisen. An den Extremitätenenden (Zehe, Fuß, Finger und Hand) und am Bauch finden sich keine signifikanten PPU. Die übrigen Körperstellen haben postovulatorisch signifikant höhere Mittel. Der größte PPU findet sich mit 0.58°C am Oberarm ($H^8 \text{ } [^{\circ}\text{C}]$: vor = 33.36; nach = 33.94; $0.001 < p < 0.005$).

Die mittlere Hauttemperatur (HM) - errechnet nach einer etwas modifizierten Formel von Pfeleiderer und Büttner (27, 29) - ist in Abb. 3 als durchgehende Linie dargestellt. Praeovulatorisch (ausgezogene Linie) beträgt der Wert 33.56°C , postovulatorisch (gestrichelte Linie) 33.93°C . Der PPU ist mit 0.37°C signifikant ($p < 0.001$). Er ist also etwas größer als der Unterschied zwischen den Rektaltemperaturen (PPU von R: 0.31°C).

Aus diesen Zahlen ergibt sich, daß bei gleicher Raumtemperatur von 28°C , das äußere Temperaturgefälle zwischen Umgebung und mittlerer Hauttemperatur postovulatorisch 6.7 % größer ist als praeovulatorisch. Gleiche äußere Wärmeübergangsbedingungen vorausgesetzt, muß die Wärmeabgabe um den gleichen Betrag erhöht sein. Es muß also, falls der Körper thermisch im Gleichgewicht gehalten werden soll, auch die Wärmebildung um diesen Betrag erhöht sein. Das innere Temperaturgefälle vom Kern zur Hautoberfläche beträgt praeovulatorisch 3.15°C , postovulatorisch 3.09°C ; es bleibt also praktisch unverändert. Hieraus und aus dem eben gezogenen Schluß, daß die Wärmeabgabe postovulatorisch größer ist, ergibt sich zwingend, daß die Bedingungen für den Wärmetransport in der Körperschale insgesamt postovulatorisch verbessert sein müssen.

3.3. O_2 -Verbrauch, CO_2 -Ausscheidung und respiratorischer Quotient

In Abb. 4 sind im oberen Diagramm $\dot{V}\text{O}_2$ und $\dot{V}\text{CO}_2$ als Mittel von 8 Versuchspersonen vor und nach der Ovulation während 28 Stunden dargestellt. Die dickeren Linien sind durch gewichtete Glättung der Originalwerte (dünne Linien) gewonnen. Die horizontalen Linien entsprechen den 24-Stunden-Mitteln. Der PPU für $\dot{V}\text{O}_2$ beträgt 0.457 ml/kg min ($\dot{V}\text{O}_2$ [ml/kg min]: vor = 5.123; nach = 5.580; $p < 0.001$) und für $\dot{V}\text{CO}_2$ 0.34 ml/kg min ($\dot{V}\text{CO}_2$ [ml/kg min]: vor = 3.725; nach = 4.065; $p < 0.005$). Das entspricht einem postovulatorisch höheren Wert für $\dot{V}\text{O}_2$ von 9.3 % und für $\dot{V}\text{CO}_2$ von 9.1 %.

Die mit Hilfe der Harmonischen Analyse errechneten Amplituden der Grundschrwingungen betragen:

Amp. $\dot{V}\text{O}_2$ [ml/kg min]: vor = 0.21; nach = 0.18.

Amp. $\dot{V}\text{CO}_2$ [ml/kg min]: vor = 0.32; nach = 0.22.

Die praeovulatorischen Amplituden sind jeweils größer als die postovulatorischen, für $\dot{V}\text{CO}_2$ signifikant ($0.025 < p < 0.05$). Bemerkenswert ist die deutlich größere Schwingungsbreite der Grundschrwingung von $\dot{V}\text{CO}_2$. Sie beträgt, in Prozenten des 24-Stunden-Mittels ausgedrückt, praeovulatorisch 17.2 % und postovulatorisch 10.7 %; die Schwingungsbreite von $\dot{V}\text{O}_2$ ist mit 8.3 % (vor) bzw. 6.6 % (nach) nur etwa halb so groß. Zwischen $\dot{V}\text{O}_2$ und $\dot{V}\text{CO}_2$ läßt sich für die Grundschrwingungen eine Phasenwinkeldifferenz von 2.27 Stunden sichern ($0.001 < p < 0.005$), wobei der O_2 -Verbrauch der CO_2 -Ausscheidung nachfolgt.

Der R (unteres Diagramm, Abb. 4) zeigt während der ersten 12 Stunden einen kontinuierlichen Abfall, wohl als Ausdruck

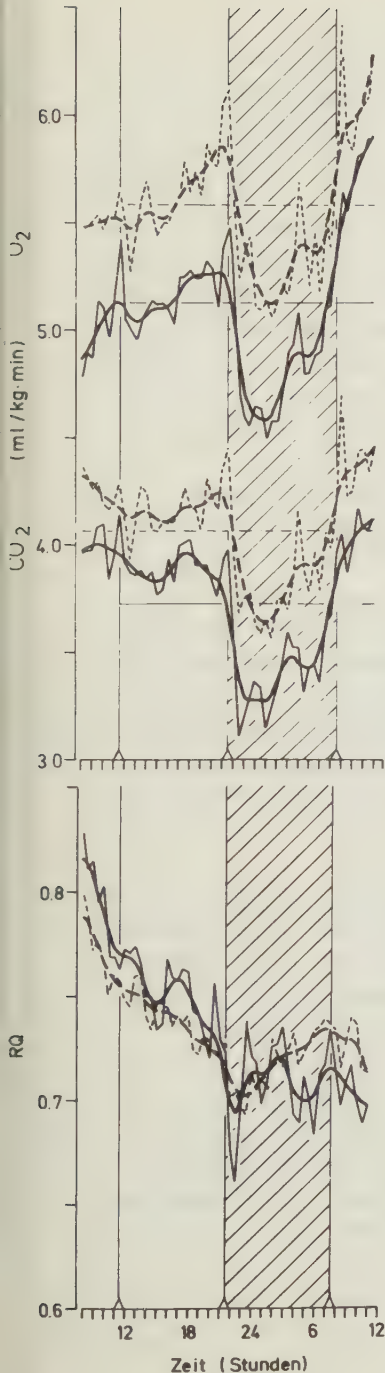


Abb. 4 Oberes Diagramm: Tagesgang des mittleren $\dot{V}O_2$ und $\dot{V}CO_2$ von 8 Versuchspersonen vor (ausgezogene Linien) und nach der Ovulation (gestrichelte Linien); dünne Linien: Originalwerte; dicke Linien: geglättete Originalwerte. Die horizontalen Linien entsprechen den 24-Stunden-Mitteln, die erste senkrechte Linie dem Beginn der Mittelung über 24 Stunden. Die senkrechte schraffierte Säule markiert die Schlafzeit.

Unteres Diagramm: Respiratorischer Quotient (RQ) als Mittel der 8 Versuchspersonen über den Verlauf des Experimentes.

der zunehmenden Verwendung körpereigener Fettreserven zur Energieproduktion, und erreicht dann ein unteres Niveau. Ein PPU läßt sich nicht nachweisen (RQ vor = 0.725; nach = 0.728; $p \gg 0.2$).

3.4. Wärmebildung, Wärmeabgabe und Wärmedurchgangszahl

Die aus $\dot{V}O_2$ und $\dot{V}CO_2$ berechnete Wärmebildung (WB) zeigt wie erwartet einen signifikanten PPU. Er beträgt 7.55 mcal/cm²min oder 178 kcal/24 Stunden (WB $\sqrt{\text{mcal/cm}^2\text{min}}$ vor = 81.38; nach = 88.93; $p < 0.001$). Das entspricht einer postovulatorischen Erhöhung der Wärmeproduktion um 9.3 %. Umgerechnet auf kcal/24 Stunden beträgt WB vor = 1922, nach = 2100.

Aus den Wärmestromdichten (W) der verschiedenen Körperstellen läßt sich nach der gleichen Formel wie für die mittlere Hauttemperatur die mittlere Wärmeabgabe (WA) des Körpers berechnen. In der Formel ist allerdings nicht berücksichtigt, daß durch die Versuchsanordnung die Wärmeabgabe an den Rückenpartien behindert ist. Deshalb liegen die so gemittelten Werte insgesamt etwas zu hoch. Es ergeben sich für die 24-Stunden-Mittel:

WA $\sqrt{\text{mcal/cm}^2\text{min}}$ vor = 85.41; nach = 91.95 ($0.01 < p < 0.025$), und umgerechnet in kcal/24 Stunden vor = 2017, nach = 2172. Der PPU von WA beträgt also 6.54 mcal/cm²min bzw. 155 kcal/24 Stunden, das entspricht einer postovulatorischen Erhöhung des Wärmedurchganges von 7.7 %.

Neben den vom Ovulationszyklus abhängigen Änderungen der Wärmebildung, Wärmeabgabe, Rektal- und mittleren Hauttemperatur läßt sich auch eine Änderung der Wärmedurchgangszahl, die als Maß der Durchblutung gelten kann (3), nachweisen.

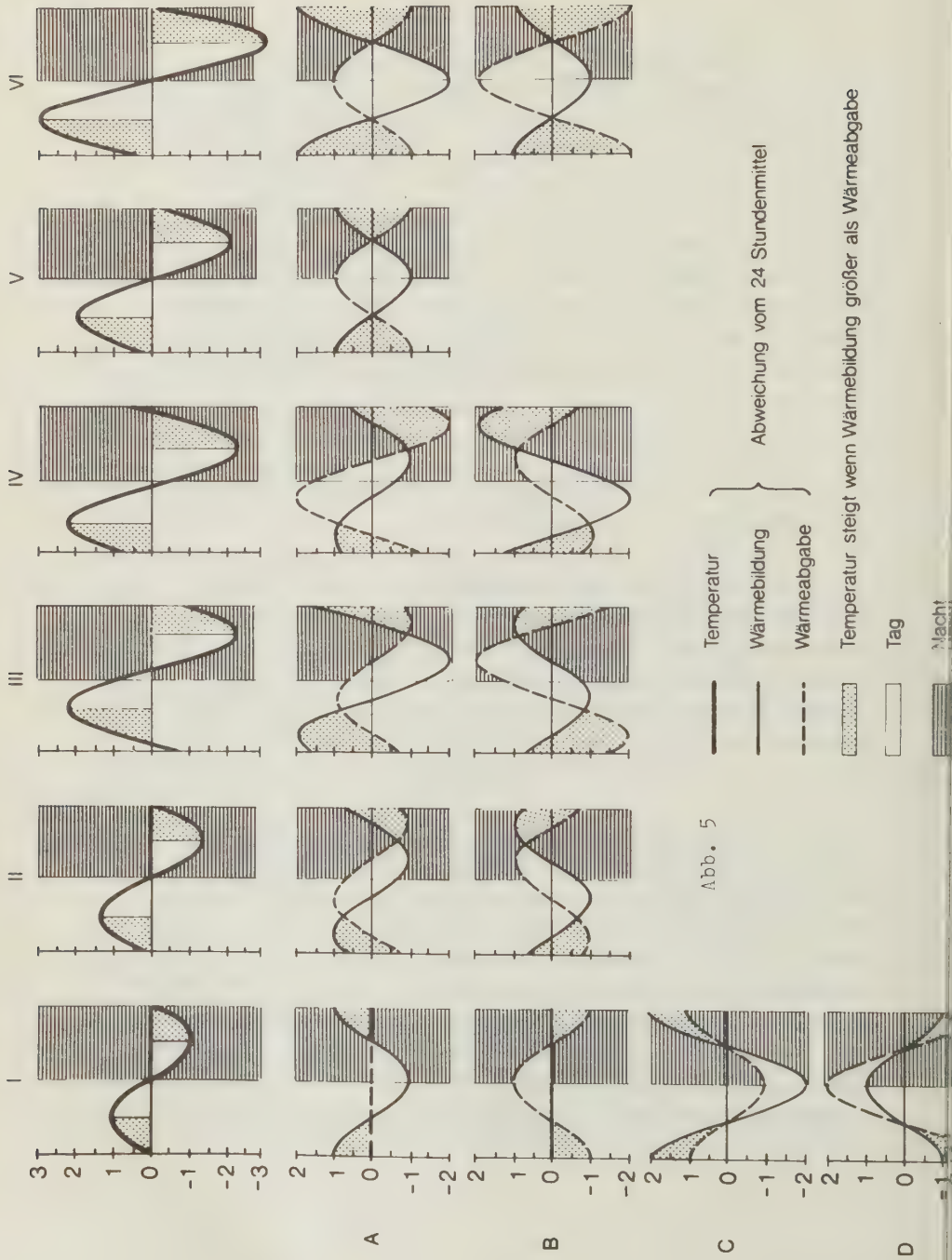
Sie ist der Koeffizient, der den mittleren Wärmefluß durch die Körperschale pro Grad Temperaturabfall zwischen Kern- und Hauttemperatur darstellt, und wird berechnet, indem man die Wärmestromdichte pro Flächeneinheit durch die Differenz Kern- minus mittlere Hauttemperatur teilt. So berechnet ergibt sich ein praeovulatorischer Wert von $27.1 \text{ mcal/cm}^2\text{min}^\circ\text{C}$ und postovulatorisch von $29.75 \text{ mcal/cm}^2\text{min}^\circ\text{C}$ - also eine Erhöhung der mittleren Wärmedurchgangszahl in der 2. Zyklushälfte um $2.65 \text{ mcal/cm}^2\text{min}^\circ\text{C}$, oder 9.8 %. Die Wärmetransportbedingungen sind also, wie im vorhergehenden gefordert, postovulatorisch verbessert.

3.5. Tagesgang der Kerntemperatur als Funktion von Wärmebildung und Wärmeabgabe

Die Temperatur eines wärmebildenden Körpers ist eine Funktion seiner Wärmebildung und der Wärmetransportbedingungen, bzw. der hiervon abhängigen Wärmeabgabe. Temperaturänderungen können nur auftreten, wenn Unterschiede zwischen Wärmebildung und Wärmeabgabe bestehen. Überschreitet die Bildung die Abgabe, muß die Temperatur steigen; wird mehr Wärme abgegeben als gebildet, sinkt sie.

Rhythmische Temperaturänderungen können allein durch periodische Schwankungen entweder der Wärmebildung oder der Wärmeabgabe hervorgerufen werden. Ebenso können beide, Wärmebildung und Wärmeabgabe, periodischen Schwankungen unterliegen; in diesem Fall treten rhythmische Temperaturänderungen jedoch nur auf, wenn zwischen beiden eine Phasensinkendifferenz oder/und Amplitudenunterschiede bestehen.

Abb. 5 veranschaulicht in vereinfachter Form und ohne Berücksichtigung von Änderungen der Wärmekapazität verschiedene theoretische Möglichkeiten: Die obere Reihe



zeigt in 6 Diagrammen verschiedene Temperaturverläufe (I - VI) über jeweils eine Periode, dargestellt als Abweichung vom Mittel; die Ordinatenzahlen geben hier nur ein relatives Maß für die Amplitudenhöhe an. Jede dieser Kurven ist das Ergebnis aller unter ihr abgebildeten im Bezug auf Phasenlage oder/und Amplitude unterschiedlichen Verläufe von Wärmebildung und -abgabe, ebenfalls als Abweichung vom Mittel dargestellt.

Der Temperaturverlauf im Diagramm I kann das Ergebnis verschiedener Verläufe von Wärmebildung und -abgabe sein: Im Diagramm IA ist die Wärmeabgabe konstant, die Wärmebildung schwankt periodisch. Solange die Wärmebildung die Wärmeabgabe überschreitet, steigt die Temperatur (in allen Diagrammen als schraffiertes Feld dargestellt). Liegt die Wärmebildung unter der Wärmeabgabe, sinkt die Temperatur wieder. Das Diagramm IB ergibt das gleiche Ergebnis bei konstanter Wärmebildung und periodischem Verlauf der Wärmeabgabe, die nun aber gegenüber dem vorhergehenden Fall um eine halbe Periodenlänge in Bezug auf deren Wärmebildung verschoben sein muß. In den Diagrammen IC und ID schwanken sowohl Wärmebildung als auch Wärmeabgabe in gleicher Phasenlage jedoch mit unterschiedlichen Amplituden. Im Diagramm IC ist die Amplitude der Wärmebildung doppelt so groß wie die der Wärmeabgabe. Die Phasenlagen entsprechen der der Wärmebildung in Diagramm IA. Im Diagramm ID ist die Amplitude der Wärmeabgabe doppelt so groß wie die der Wärmebildung. Die Phasenlagen entsprechen der der Wärmeabgabe im Diagramm IB.

Die Diagramme der Spalte II zeigen zwei Fälle, in denen sowohl Wärmebildung als auch Wärmeabgabe mit gleicher Amplitude schwanken. Hierbei wurden die Phasenlagen von Wärmebildung und -abgabe so gewählt, daß die Phasenlagen der Temperaturkurven von I und II gleich sind. Die Phasenwinkeldifferenz zwischen Wärmebildung und -abgabe beträgt $1/4$ Periode. Die Amplitude der Temperaturkurve ist im Diagramm II größer als

im Diagramm I. Sie ist abhängig von der Phasenwinkeldifferenz zwischen Wärmebildung und -abgabe; die Amplitude vergrößert sich mit zunehmender Phasenwinkeldifferenz (siehe Diagramm VA), bzw. verringert sich mit abnehmender Phasenwinkeldifferenz. Im Diagramm IIA folgt die Schwingung der Wärmeabgabe der der -bildung nach. Im Diagramm IIB folgt umgekehrt die Schwingung der Wärmebildung der der -abgabe. Entsprechend müssen sich die Phasenlagen wie in den Diagrammen IA/B und IC/D ändern.

In den folgenden beiden Spalten III und IV sind die Phasenlagen in der Zeile A gleich der von II A, in der Zeile B gleich der von IIB. Im Diagramm IIIA ist die Amplitude der Wärmebildung, in IIIB die Amplitude der Wärmeabgabe verdoppelt. Das hat zur Folge, daß sich die Amplitude der Temperaturkurve vergrößert und die Phasenlage sich leicht nach rechts verschiebt. Im Diagramm IVA ist die Amplitude von Wärmeabgabe, in IVB die von Wärmebildung verdoppelt. Das hat ebenfalls eine Vergrößerung der Amplitude der Temperaturkurve zur Folge und eine Phasenverschiebung nach links. Diese 4 Diagramme zeigen, daß eine Phasenverschiebung der Temperaturkurve bereits ohne Änderung der Phasenlage von Wärmebildung und -abgabe zustande kommen kann, allein dadurch, daß Amplitudenunterschiede zwischen Wärmebildung und -abgabe auftreten. Natürlich kann an einer Phasenverschiebung des Temperaturverlaufs auch eine Änderung der Phasenlage von Wärmebildung oder/und Wärmeabgabe beteiligt sein.

Im Diagramm VA verlaufen Wärmebildung und -abgabe mit einer Phasenwinkeldifferenz von 180° . Dementsprechend ist die Amplitude der Temperaturkurve gegenüber Diagramm II vergrößert. Weitere Vergrößerungen dieser Amplitude sind möglich, wenn wie im Diagramm VI in Fall A die Amplitude der Wärmebildung oder im Fall B die Amplitude der Wärmeabgabe vergrößert wird. Jetzt kann hierdurch die Phasenlage der Temperaturkurve nicht beeinflußt werden.

Welche dieser verschiedenen Möglichkeiten trifft nun für die tagesperiodischen Änderungen der Körpertemperatur beim Menschen zu? Drei wesentliche Faktoren sind diesbezüglich bekannt:

1. Die Kerntemperatur ist tags höher als nachts (Abb. 2).
Demgemäß sind in Abb. 5 alle Temperaturverläufe so angeordnet, daß die Mittel des Tages über denen der Nacht liegen.
2. Ebenfalls ist die Wärmebildung tagsüber größer als nachts (Abb. 4).
3. Außerdem ist bekannt, daß die Durchblutung an den Extremitätenenden, die als Effektoren der Temperaturregulation gelten, an den späten Abend- und frühen Nachtstunden, wenn die Kerntemperatur sinkt, sehr stark zunimmt (6).

Daraus geht hervor, daß nur Fälle in Betracht kommen können, die den Diagrammen IIA, IIIA oder IVA entsprechen, d.h. die Schwingung der Wärmebildung muß der der Wärmeabgabe vorausgehen.

Diese Überlegungen sind auch auf die in diesem Experiment untersuchten Größen übertragbar. Der Tagesgang der Kerntemperatur, als Rektaltemperatur gemessen, läßt sich beschreiben als Funktion der Wärmebildung und der Gesamt-Wärmeabgabe, - aus den Wärmeabgaben der einzelnen Körperstellen gemittelt und nach deren Oberflächenanteilen gewichtet.

Für die folgenden 2 Darstellungen ist über die Werte aller prae- und postovulatorischen Messungen zusammen gemittelt worden. Abb. 6 zeigt zur besseren methodischen Erläuterung der folgenden Abb. 7 die Originalwerte der Rektaltemperatur.

Abb. 6 Tagesgang der Rektaltemperatur (R) über alle 8 Versuchspersonen und alle Versuche vor und nach der Ovulation gemittelt. Die Originalwerte sind mit ausgezogener Linie dargestellt; gestrichelt eingezeichnet ist die nach Harmonischer Analyse berechnete Grundschiwingung mit ihren ersten 5 Oberschwingungen; diese Kurve beschreibt die Originalwerte sehr genau.

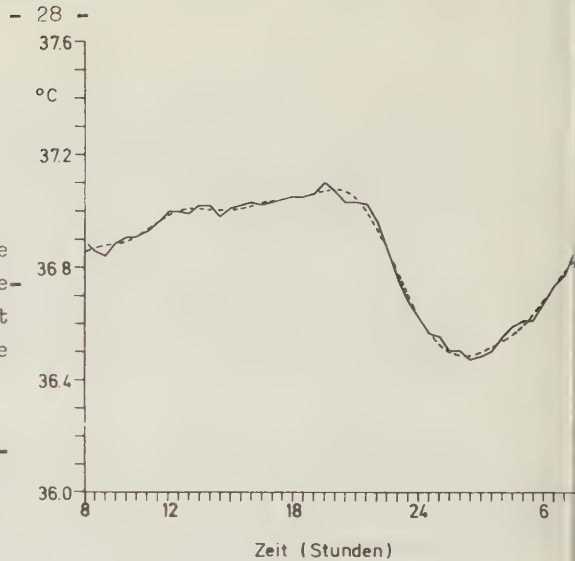
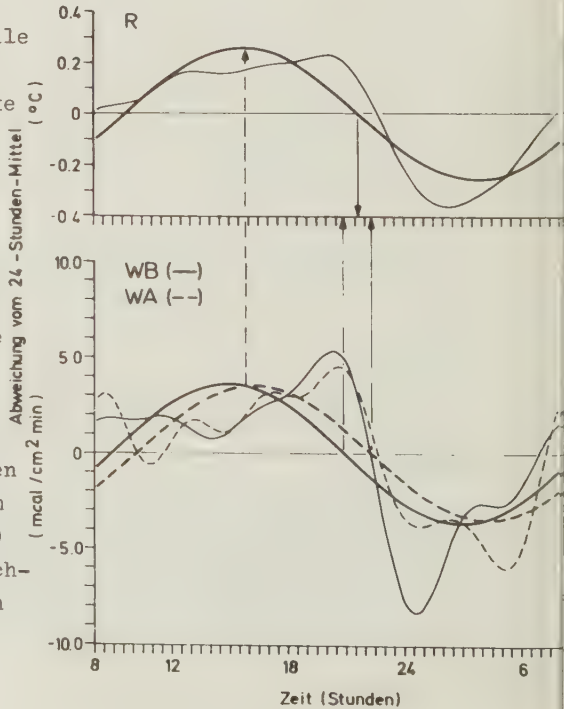


Abb. 7 Oberes Diagramm:

Tagesgang der Rektaltemperatur (R), gemittelt über alle Versuche, dargestellt als Abweichung vom 24-Stunden-Mittel. Dicke Linie: Grundschiwingung; dünne Linie: Grundschiwingung mit ihren ersten fünf Oberschwingungen; horizontale Linie: Gleichwert.

Unteres Diagramm: Tagesgang der Wärmebildung (ausgezogene Linien) und der Wärmeabgabe (gestrichelte Linien) entsprechend dem oberen Diagramm dargestellt. Der erste senkrechte Pfeil, errichtet im Schnittpunkt der Grundschiwingungen von WB und WA, trifft das Maximum der Grundschiwingung (= Akrophase) von R. Die drei folgenden senkrechten ausgezogenen Pfeile markieren die Phasenlage (Wendepunkte) von WB, R und WA auf der oberen Abszisse.



Gestrichelt ist die nach Harmonischer Analyse errechnete Grundschiwingung mit ihren ersten fünf Oberschwingungen eingezeichnet. Wie deutlich zu sehen ist, beschreibt die als kombinierte Sinus-Cosinus-Funktionen dieser Schwingungen mathematisch beschreibbare Kurve die Originalwerte ziemlich genau.

Im oberen Diagramm der Abb. 7 ist nun als dicke Linie die Grundschiwingung und als dünne die Grundschiwingung mit ihren ersten 5 Oberschwingungen dargestellt. Die Ordinate gibt diesmal die Rektaltemperatur (R) als Abweichung vom 24-Stunden-Mittel an. Im unteren Teil ist auf die gleiche Art die Wärmebildung (WB, ausgezogen) und die Wärmeabgabe (WA, gestrichelt) dargestellt. Bezogen auf den ersten gemessenen Wert um 8 Uhr lauten die Parameter der Grundschiwingung für die Rektaltemperatur (in °C):

$$F(R) = 36.8452 - 0.105 \cdot \cos(R) + 0.2356 \cdot \sin(R)$$

Amplitude: 0.26

für die Wärmebildung (in $\text{mcal/cm}^2\text{min}$):

$$F(WB) = 83.9183 - 0.8692 \cdot \cos(WB) + 3.5208 \cdot \sin(WB)$$

Amplitude: 3.6

für die Wärmeabgabe (in $\text{mcal/cm}^2\text{min}$):

$$F(WA) = 88.1977 - 1.9263 \cdot \cos(WB) + 2.8955 \cdot \sin(WB)$$

Amplitude: 3.5

Verfolgt man die Kurven der Grundschiwingung von WB und WA (unteres Diagramm, Abb. 7) von links nach rechts und vergleicht sie mit der Grundschiwingung von R (oberes Diagramm, Abb. 7), so wird deutlich: solange WB über WA liegt, steigt R an. Das Maximum von R ist erreicht, wenn WB und WA sich überschneiden (siehe senkrechten, gestrichelten Pfeil), und R fällt wieder ab, solange WA über WB liegt. Zwischen der Grundschiwingung von WB und WA besteht eine Phasenwinkel-differenz von 1.23 Stunden (siehe Abstand der senkrechten ausgezogenen Pfeile im unteren Diagramm auf der oberen Abszisse). Berechnet man die Phasenwindeldifferenzen jeder

einzelnen Versuchsperson, läßt sich im Mittel ein signifikanter Unterschied von 2.37 Stunden sichern ($0.025 < p < 0.05$). Die Phasenwinkeldifferenzen zwischen WB und R (Abstand zwischen erstem ausgezogenen Pfeil vom unteren und ausgezogenen Pfeil vom oberen Diagramm auf der Abszisse) und zwischen R und WA (Abstand zwischen oberem Pfeil und letztem unteren Pfeil) sind hingegen nicht signifikant.

Die im unteren Diagramm von Abb. 7 dünn eingezeichneten Linien geben die nach Harmonischer Analyse mit 5 Oberschwingungen geglätteten Originalwerte für WB und WA wieder, dargestellt ebenfalls als Abweichung vom 24-Stunden-Mittel. Aus den dazugehörigen ungeglätteten Originalwerten läßt sich für jede halbe Stunde die Differenz zwischen WB - Abweichung (WB_A) und WA - Abweichung (WA_A) in $\text{mcal/cm}^2\text{min}$ errechnen. Diese Differenz, die ausdrückt, um wieviel die Wärmebildung in jeder halben Stunde die Wärmeabgabe über- bzw. unterschreitet, bildet in Abb. 8 die Abszisse; ihr zugeordnet sind auf der Ordinate die halbstündlichen Änderungen der Rektaltemperatur (DT) in $^{\circ}\text{C}$. Durch die so erhaltenen 47 Punkte läßt sich eine Regressionsgerade legen, deren Gleichung lautet:

$$DT = 0.0083 (WB_A - WA_A) + 0.0007$$

Der Korrelationskoeffizient beträgt $r = 0.5677$. Die Gerade verläuft praktisch durch den 0-Punkt. Aus der Gleichung folgt: wird während $1/2$ Stunde durchschnittlich $1 \text{ mcal/cm}^2\text{min}$ mehr Wärme produziert als abgegeben, steigt innerhalb dieser Zeit die Rektaltemperatur um 0.009°C , also rund $1/100^{\circ}$.

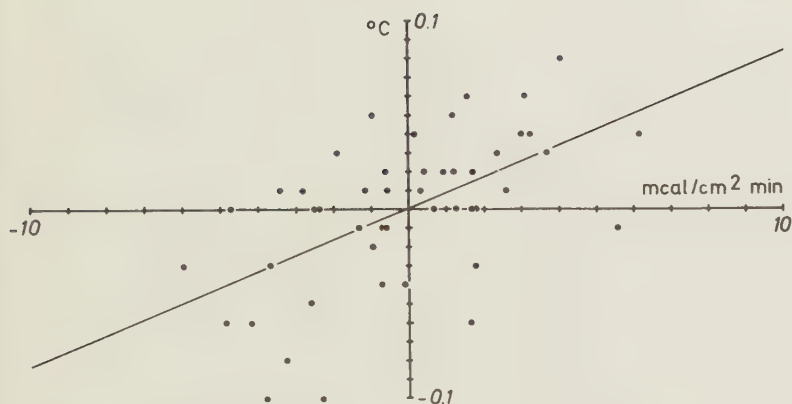


Abb. 8 Die Ordinate gibt die halbstündlichen Änderungen der Rektaltemperatur (DT) in $^{\circ}\text{C}$ von Abb. 6 wieder. Auf der Abszisse sind die Differenzen der Abweichung vom 24-Stunden-Mittel zwischen Wärmebildung (WB_A) und Wärmeabgabe (WA_A) in $\text{mcal/cm}^2 \text{ min}$ eingetragen. Die Regressionsgerade gibt an, um wieviel $^{\circ}\text{C}$ die Rektaltemperatur steigt oder fällt, wenn die Wärmebildung die Wärmeabgabe über- (rechter oberer Quadrant) oder unterschreitet (linker unterer Quadrant).

3.6. Vergleich verschiedener Körperstellen

Der Tagesgang der Wärmestromdichte (W) hat an den verschiedenen Körperstellen einen sehr unterschiedlichen Verlauf:

Abb. 9 zeigt die Grundschiwingung der Wärmeabgabe an der Zehe (W^1) und am Bauch (W^5) prae- und postovulatorisch in der Darstellung der Harmonischen Analyse mit (dünne Linien) und ohne Oberschwingungen (dicke Linien). Am Bauch ist das 24-Stunden-Mittel postovulatorisch signifikant höher. Der PPU beträgt $20.02 \text{ mcal/cm}^2\text{min}$:

$W^5 \text{ [mcal/cm}^2\text{min]}$ vor = 92.42; nach = 112.44; $p < 0.001$.

Die Wärmeabgabe an der Zehe (W^1) hat ein postovulatorisch tieferes 24-Stunden-Mittel; der PPU ist jedoch nicht signifikant:

$W^1 \text{ [mcal/cm}^2\text{min]}$ vor = 59.90; nach = 52.77; $0.1 < p < 0.2$.

Die Amplitude der Grundschiwingung ist praeovulatorisch sowohl an der Zehe als auch am Bauch größer. Signifikant ist dieser Unterschied ebenfalls nur am Bauch:

Amp. $W^5 \text{ [mcal/cm}^2\text{min]}$ vor = 9.88; nach = 4.74; $0.02 < p < 0.025$;

Amp. $W^1 \text{ [mcal/cm}^2\text{min]}$ vor = 24.96; nach = 18.54; $p > 0.2$.

Die mittlere Phasenwinkeldifferenz zwischen den Grundschiwingungen der Wärmestromdichte an Zehe und Bauch beträgt 7 Stunden ($p < 0.001$). Die Grundschiwingung der Wärmeabgabe am Bauch (W^5) folgt der der Rektaltemperatur (R) dicht mit einer Phasenwinkeldifferenz von 1.82 Stunden; für jede einzelne Versuchsperson berechnet beträgt die Phasenwinkeldifferenz im Mittel 1.33 Stunden ($0.05 < p < 0.1$). Die Grundschiwingung der Wärmeabgabe an der Zehe (W^1) steht zur Grundschiwingung der Rektaltemperatur (R) in einer Phasenwinkeldifferenz von 8.82 Stunden ($p < 0.001$). Diese Beziehungen drücken sich auch in der positiven Korrelation von R und W^5 aus: r vor = 0.66; nach = 0.81; $n = 48$, sowie in der negativen Korrelation von R und W^1 : r vor = - 0.70; nach = - 0.77; $n = 48$.

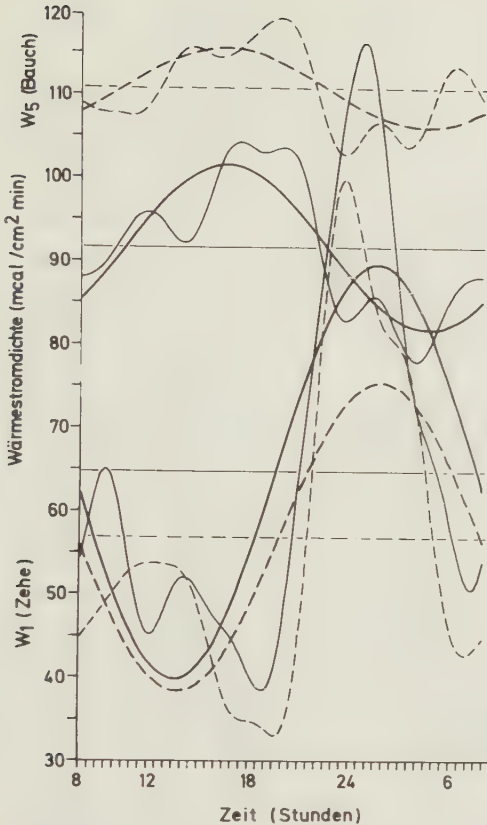


Abb. 9 Tagesgang der Wärmestromdichte an Bauch (W_5) und Zehe (W_1) vor (ausgezogene Linien) und nach der Ovulation (gestrichelte Linien) als Mittel von 8 Versuchspersonen in der Darstellung der Harmonischen Analyse: die dicken Linien entsprechen den Grundschwingungen, die dünnen Linien den Grundschwingungen mit ihren ersten fünf Oberschwingungen. Als horizontale Linien sind die Gleichwerte (= 24-Stunden-Mittel) eingezeichnet.

Die übrigen Körperstellen nehmen eine Zwischenstellung zwischen diesen beiden Extremen ein. Fuß (w^2), Finger (w^{11}) und Hand (w^{10}) verhalten sich ähnlich wie die Zehe (w^1) mit großen tagesperiodischen Amplituden der Wärmeabgabe, gleicher Phasenlage und ohne signifikanten PPU im 24-Stunden-Mittel oder mit postovulatorisch tieferen Werten, wie z.B. an der Hand (w^{10} $\underline{\text{mcal/cm}^2\text{min}}$ vor = 95.80; nach = 85.99; $0.05 < p < 0.1$). Die Wärmeabgaben an Unterschenkel (w^3), Oberschenkel (w^4) und Unterarm (w^9) haben nur einen geringen Tagesgang, die postovulatorischen Werte liegen höher, wenn auch nicht signifikant. An der Brust (w^6) liegt die Amplitude der Wärmeabgabe etwa im gleichen Bereich wie am Bauch (w^5), beide haben auch gleiche Phasenlage. Der PPU der 24-Stunden-Mittel ist an diesen Körperstellen nicht so ausgeprägt wie am Bauch und nicht signifikant. Ähnlich verhält sich auch die Wärmeabgabe am Oberarm (w^8). Hier ist der PPU signifikant und beträgt 13.04 $\text{mcal/cm}^2\text{min}$ (w^8 $\underline{\text{mcal/cm}^2\text{min}}$ vor = 84.69; nach = 97.73; $0.01 < p < 0.025$). Die Wärmeabgabe an der Stirn ist wegen der oben beschriebenen Umstände (Plexiglashaube) nicht eindeutig mit den übrigen Körperstellen vergleichbar. Es ist kein deutlicher Tagesgang zu sehen; der postovulatorische Wert liegt, allerdings nicht signifikant, höher.

Die Wärmedurchgangszahl kann wie für den ganzen Körper auch für einzelne Körperstellen berechnet werden, indem man die an dieser Stelle gemessene Wärmestromdichte durch die Differenz Kern- minus Hauttemperatur teilt. In Abb. 10 ist der Tagesgang der Wärmedurchgangszahlen an 4 Körperstellen vor und nach der Ovulation dargestellt. An der Zehe (z^1) (linkes unteres Diagramm in Abb. 10) ist der PPU des 24-Stunden-Mittels nicht signifikant (z^1 $\underline{\text{mcal/cm}^2\text{min}^\circ\text{C}}$ vor = 18.52; nach = 15.36; $0.1 < p < 0.2$). Berechnet man jedoch diesen Unterschied zur Zeit der "Kernentladung", d.h. zur Zeit der maximalen peripheren Durchblutung, als

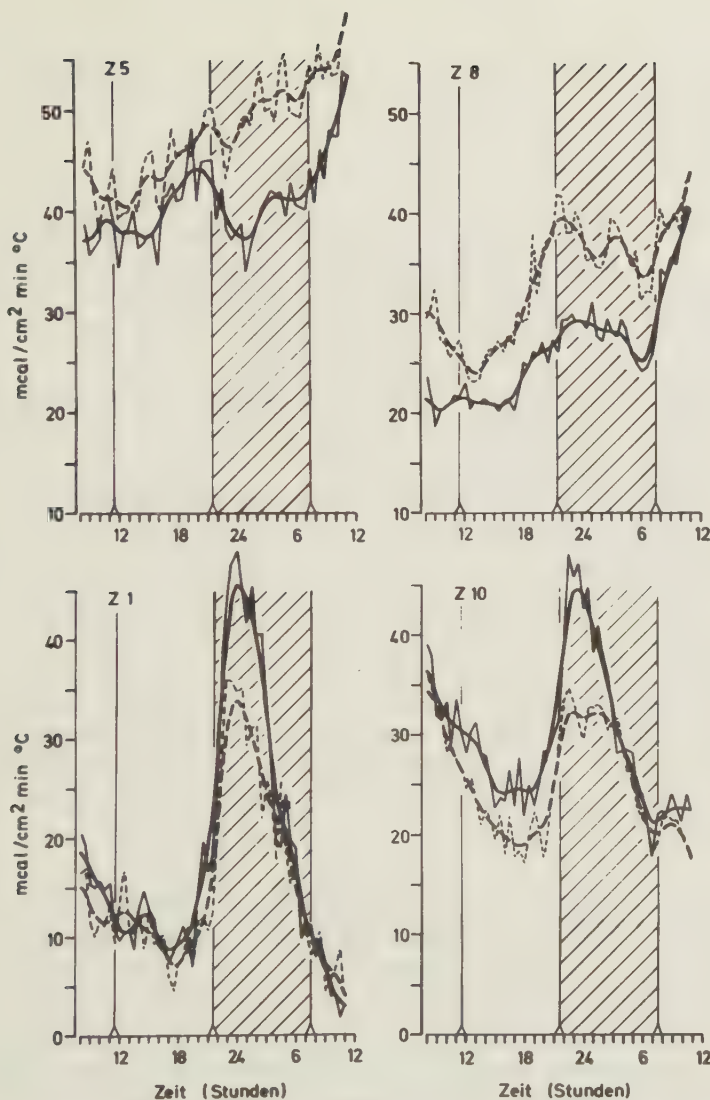


Abb. 10 Tagesgang der Wärmedurchgangszahlen an Zehe (Z^1), Hand (Z^{10}), Bauch (Z^5) und Oberarm (Z^8) als Mittel von 8 Versuchspersonen vor (ausgezogene Linien) und nach der Ovulation (gestrichelte Linien). Als dünne Linien sind die Originalwerte gezeichnet, die dicken Linien sind durch gewichtetes Glätten gewonnen. Die erste senkrechte Linie gibt den Beginn der Mittelung über 24 Stunden an. Die senkrechten schraffierten Säulen markieren die Schlafzeiten.

Mittel über 6 Stunden von 19.30 Uhr bis einschließlich 1 Uhr ($Z^{1'}$), findet sich ein postovulatorisch signifikant tieferer Wert:

$Z^{1'} \left[\text{mcal/cm}^2 \text{min}^\circ \text{C} \right]$ vor = 30.62; nach = 22.91; $0.02 < p < 0.025$.

Zwischen den Amplituden der Grundschrwingungen läßt sich für Z^1 ein PPU von $4.33 \text{ mcal/cm}^2 \text{min}^\circ \text{C}$ sichern ($0.025 < p < 0.05$).

Die Hand (Z^{10}) (rechtes unteres Diagramm Abb. 10) hat insgesamt eine höhere Wärmedurchgangszahl als die Zehe. Der praeovulatorische Wert ist signifikant höher:

$Z^{10} \left[\text{mcal/cm}^2 \text{min}^\circ \text{C} \right]$ vor = 28.96; nach = 24.21; $0.01 < p < 0.025$.

Die praeovulatorische Amplitude der Grundschrwingung ist, allerdings nicht signifikant, größer:

Amp. $Z^{10} \left[\text{mcal/cm}^2 \text{min}^\circ \text{C} \right]$ vor = 5.13; nach = 4.59; $p > 0.2$.

Am Bauch (Z^5) (linkes oberes Diagramm in Abb. 10) und am Oberarm (Z^8) (rechtes oberes Diagramm in Abb. 10) sind, im Gegensatz zu den Extremitätenenden, die postovulatorischen Werte höher:

$Z^5 \left[\text{mcal/cm}^2 \text{min}^\circ \text{C} \right]$ vor = 41.55; nach = 48.64; $0.025 < p < 0.05$;

$Z^8 \left[\text{mcal/cm}^2 \text{min}^\circ \text{C} \right]$ vor = 26.97; nach = 33.89; $0.025 < p < 0.05$.

Alle vier Diagramme lassen über die Versuchszeit einen Trend erkennen; er hat in Rumpfnähe (obere Diagramme) eine steigende, an den Extremitätenenden (untere Diagramme) eine fallende Tendenz.

Trotz gleicher Umgebungsbedingungen lassen sich am Bauch und an der Hand signifikante prae-/postovulatorische Unterschiede in der äußeren Wärmeübergangszahl (U) nachweisen. Am Bauch ist der postovulatorische Wert um $2.46 \text{ mcal/cm}^2 \text{min}^\circ \text{C}$ höher ($U^5 \left[\text{mcal/cm}^2 \text{min}^\circ \text{C} \right]$ vor = 14.74; nach = 17.20;

$0.005 < p < 0.01$), an der Hand dagegen um $1.86 \text{ mcal/cm}^2 \text{min}^\circ \text{C}$ niedriger ($U^{10} \left[\text{mcal/cm}^2 \text{min}^\circ \text{C} \right]$ vor = 19.30; nach = 17.44;

$0.025 < p < 0.05$). Das bedeutet eine postovulatorische

Verbesserung der äußeren Wärmeübergangsbedingungen am Bauch um 16.5 % und an der Hand eine Verschlechterung um 10.7 %.

Die mittlere Wärmeübergangszahl bleibt hingegen unverändert ($U_M \left[\text{mcal/cm}^2 \text{min}^\circ \text{C} \right]$ vor = 15.36; nach = 15.55; $p \gg 0.2$).

4. Diskussion

4.1. Kern- und Hauttemperaturen

Wie zu erwarten, erstreckt sich der Einfluß der post-ovulatorischen Progesteronproduktion auf den ganzen Tagesgang der Körpertemperatur, d.h. auf das 24-Stunden-Mittel. Es ist jedoch nicht nur dieses erhöht, sondern gleichzeitig die Amplitude infolge geringeren nächtlichen Temperaturabfalles verkleinert. Im Vergleich zu den Untersuchungen von Horvath et al. (28), die die morgendliche Basaltemperatur vor dem Aufstehen im Bett bestimmten und praeovulatorische Mittel bei 36.78°C und postovulatorisch bei 37.22°C fanden, liegen die hier gemessenen 24-Stunden-Mittel praeovulatorisch um 0.06°C und, was besonders auffällt, postovulatorisch sogar um 0.2°C niedriger; der PPU von 0.44° wird bei unseren Versuchen annähernd gerade nur zur Zeit des größten Unterschiedes, nachts um 2.30 Uhr, erreicht. Diese Unterschiede sind durch die verschiedenen Umgebungstemperaturen zu erklären, die morgens im Bett sicher über 28°C lagen! Nach Heise (27) steigt nämlich mit zunehmender Umgebungstemperatur der Gleichwert der Rektaltemperatur. Auffällig ist der größere Unterschied beim Vergleich der postovulatorischen Mittel. Der Einfluß der Umgebungstemperatur auf die Körpertemperatur muß demnach prae- und postovulatorisch verschieden sein.

Mit wachsender Temperaturdifferenz zwischen Kern- und Umgebungstemperatur wachsen die Temperaturunterschiede zwischen verschiedenen Oberflächengebieten. Dieser für unterschiedliche Raumtemperaturen mehrfach beschriebene Tatbestand (4, 5) wird hier durch Messungen bei verschiedener Körpertemperatur bedingt (Abb. 3).

4.2. Bilanz im Zyklus und im Tagesgang

An der seit langem bekannten und oft bestätigten Erhöhung der Kerntemperatur nach der Ovulation können zwei Mechanismen in verschiedenem Ausmaß beteiligt sein:

- a) Ein verminderter Wärmetransport vom Körperkern zur Schale bei unveränderter Wärmebildung.
- b) Eine Erhöhung der Wärmebildung bei unverändertem oder sogar erhöhtem Wärmetransport durch die Körperschale.

Die Ergebnisse dieser Untersuchung zeigen, welchem dieser Mechanismen die größere Bedeutung zukommt:

Die mittlere Hauttemperatur ist im 24-Stunden-Mittel postovulatorisch um 0.37°C erhöht, bzw. das äußere Temperaturgefälle zwischen Haut und Umgebung um 6.7 % gesteigert. In guter Übereinstimmung hierzu steht die Erhöhung der Wärmeabgabe um 7.7 %. Der geringe Unterschied von nur 1 % spricht für die Genauigkeit der Meßmethode. Soll unter diesen Bedingungen thermisches Gleichgewicht herrschen, muß die Wärmebildung ebenfalls erhöht sein. Es findet sich eine postovulatorische Steigerung der Wärmebildung um 9.3 %. Die unterschiedliche Änderung zwischen Wärmeabgabe und Wärmebildung von 2.6 % kann auf einer Meßungenauigkeit beruhen, aber auch darauf, daß die Gradienten-Kalorimeter im wesentlichen nur die trockene Wärmeabgabe erfassen; die nicht gemessene feuchte Wärmeabgabe ist aber prae- und postovulatorisch vermutlich ebenfalls verschieden.

Es besteht weiterhin die Frage, ob der Wärmetransport unverändert bleibt. In diesem Fall müßte das innere Gefälle zwischen Kern- und Hauttemperatur stark steigen. Es ändert sich jedoch nicht. Stattdessen ist die mittlere Wärmedurchgangszahl postovulatorisch um 9.8 % erhöht. Die Erhöhung der Wärmebildung ist also der Mechanismus, der nach diesen Ergebnissen die Erhöhung der Kerntemperatur, der mittleren Hauttemperatur und der Wärmedurchgangszahl im 24-Stunden-Mittel bedingt.

Die große Genauigkeit der hier verwendeten Meßtechnik und Berechnungsmethoden, die beim Vergleich der PPU der verschiedenen thermoregulatorischen Größen auffällt, kommt auch beim Vergleich der Beziehungen zwischen den tagesperiodischen Änderungen von Wärmebildung, Wärmeabgabe und Rektaltemperatur und der folgenden Überschlagsrechnung zum Ausdruck:

Überschreitet die Wärmebildung die Wärmeabgabe um $1 \text{ mcal/cm}^2\text{min}$, dann entspricht dieser Wärmeüberproduktion nach Abb. 8 ein Anstieg der Kerntemperatur von rund $1/100^\circ$ in 30 min. Die Versuchspersonen hatten ein mittleres Körpergewicht von 57.3 kg, eine durchschnittliche Größe von 167,4 cm und damit eine Oberfläche von 16400 cm^2 . Eine Wärmeüberproduktion von $1 \text{ mcal/cm}^2\text{min}$ ergibt somit für die ganze Versuchsperson während 30 min.:

$30 \text{ } [\text{mcal}/30 \text{ min cm}^2] \cdot 16400 \text{ } [\text{cm}^2] = 492 \text{ } [\text{cal}/30 \text{ min}]$.
Der menschliche Körper hat eine mittlere spezifische Wärme von 0.83 cal/g (16), das bedeutet, um 1 g um 1°C zu erhöhen, werden 0.83 cal benötigt. Mit 492 cal können 57.3 kg um $492 \text{ } [\text{cal}] / (0.83 \text{ } [\text{cal/g}^\circ\text{C}] \cdot 57300 \text{ } [\text{g}]) = 0.01^\circ\text{C}$ aufgeheizt werden - das gleiche Ergebnis, das sich aus der Regressionsgeraden in Abb. 8 ablesen läßt.

4.3. Tagesperiodik thermoregulatorischer Größen

Wie für die Änderungen der Kerntemperatur in Abhängigkeit vom Zyklus gibt es auch für die Entstehung ihrer tagesperiodischen Schwankungen zwei Möglichkeiten:

- a) Rhythmische Änderungen der Wärmedurchgangszahl bei konstanter Wärmebildung.
- b) Tagesperiodische Änderungen der Wärmebildung bei mehr oder weniger unverändertem Wärmetransport.

Die Wärmebildung zeigt eine deutliche Tagesperiodik. Ein Tagesgang der Kerntemperatur kann allerdings erst entstehen, wenn die Wärmeabgabe nicht mit gleicher Amplitude bzw. nicht phasengleich oszilliert. Die Amplituden der Grundschrwingungen von Wärmeabgabe und Wärmebildung sind gleich; die Grundschrwingung der Wärmeabgabe folgt jedoch der der Wärmebildung mit einer Phasenwinkeldifferenz von 1.23 Stunden. Hierin liegt die Ursache für den Tagesgang der Kerntemperatur. Zwischen 2.30 Uhr und 19.30 Uhr steigt die Kerntemperatur von ihrem Minimum auf ihren Maximalwert. Während dieser Zeit liegt die Wärmebildung im Durchschnitt immer etwas über der Wärmeabgabe. In den übrigen 6 Stunden während des Kerntemperaturabfalles ist umgekehrt die Wärmeabgabe größer als die Wärmebildung (Abb. 7).

Unter den hier gegebenen Versuchsbedingungen tragen Wärmebildung und -abgabe etwa im gleichen Ausmaß zu den tagesperiodischen Änderungen der Kerntemperatur bei, wie aus deren Amplituden der Grundschrwingungen zu ersehen ist. Die Schwingungsbreiten der Originalwerte entsprechen sich nicht genau; die der Wärmebildung ist etwas größer als

die der Wärmeabgabe (Abb. 7). Eine wichtige Rolle spielt hierbei für die Bestimmung der Gesamt-Wärmeabgabe natürlich die Gewichtung der einzelnen Körperstellen, die nur approximativ deren Oberflächenanteil an der gesamten Körperoberfläche wiedergeben kann. Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchungen zeigen Bedeutung und Verwendungsmöglichkeit der hier benutzten Gewichtung einzelner Körperoberflächen (27, 29) auch für quantitative Überlegungen zum Wärmehaushalt.

4.4. Vergleich thermoregulatorischer Funktionen verschiedener Körperstellen in Tagesgang und Zyklus

Die Gesamt-Wärmeabgabe setzt sich aus den Wärmeabgaben der verschiedenen Körperteile zusammen, die - wie in Abb. 9 demonstriert - einen sehr unterschiedlichen Verlauf in Bezug auf Amplitude und Phasenlage haben können. Die große Phasenwinkeldifferenz zwischen den Grundschwingungen der Wärmeabgabe an Extremitätenenden und Rumpf, die z.B. zwischen Zehe und Bauch 7 Std. beträgt, hat zur Folge, daß sich die Amplituden von Wärmeabgabe und Wärmebildung entsprechen, obwohl an einzelnen Körperstellen die Amplituden der Wärmeabgabe die der Wärmebildung beträchtlich überschreiten:

Amp. vor $\sqrt{\text{mcal/cm}^2\text{min}}$: $W^1 = 24.96$, $W^5 = 9.88$, $WB = 4.10$
Amp. nach $\sqrt{\text{mcal/cm}^2\text{min}}$: $W^1 = 18.54$, $W^5 = 4.74$, $WB = 3.21$

Möglicherweise ist die Beteiligung von Wärmebildung und Wärmeabgabe am Tagesgang der Kerntemperatur bei anderen Umgebungstemperaturen unterschiedlich. Bei kälterer Umgebung tritt eine Verkleinerung der Phasenwinkeldifferenz zwischen Rumpf- und Extremitätentemperaturen auf (27), was eine Änderung der Amplitude der Gesamt-Wärmeabgabe zur Folge haben könnte. Ausdruck einer unterschiedlichen Beteiligung von Wärmebildung und -abgabe

müßten dann charakteristische Änderungen in der Kurvenform der Rektaltemperatur sein, die sich andeutungsweise auch in der Untersuchung von Heise finden. Auf Grund dieser Arbeit wurde eine größere Beteiligung der Wärmeabgabe vermutet (15).

Die Extremitätenenden sind durch die größere Variabilität der Durchblutung und den Gegenstromwärmeaustausch die Effektoren der Temperaturregulation (6, 7). Wenn sie in den Abendstunden viel Wärme abgeben, sinkt die Körpertemperatur. Auch in Abhängigkeit von der Ovulation zeigen sie ihre temperaturregulatorische Sonderstellung. Während postovulatorisch am Rumpf die Wärmedurchgangszahlen entsprechend der Wärmebildung erhöht sind, finden sich an den Extremitätenenden entweder keine prae-/postovulatorischen Unterschiede oder sogar postovulatorisch niedrigere Werte.

Deutliche Unterschiede in Abhängigkeit vom Ovulationszyklus treten auch zwischen den Amplituden der Wärmedurchgangszahlen an den Extremitätenenden auf. Am Vor- und Nachmittag besteht prae- und postovulatorisch maximale Vasokonstriktion. In den Abend- und frühen Nachtstunden tritt Vasodilatation auf, postovulatorisch jedoch weniger als praeovulatorisch. Hier ist einer der Gründe für die kleinere postovulatorische Schwingungsbreite der Rektaltemperatur, die sich gerade durch den geringeren nächtlichen Temperaturabfall bemerkbar macht. Es ist also auch eine Verringerung der Wärmedurchgangszahl an Teilen des Körpers an der postovulatorischen Erhöhung der Kerntemperatur beteiligt, die sich aber nur im Tagesgang durch eine Verkleinerung des negativen Scheitelwertes bemerkbar macht.

Auch die Wärmeabgabe an den Extremitätenenden folgt, entsprechend den Wärmedurchgangszahlen, nicht wie am Rumpf der höheren postovulatorischen Wärmebildung, sondern

zeigt vielmehr entweder keinen PPU oder ebenfalls post-ovulatorisch niedrigere Werte. Der prozentmäßige Anteil der Wärmeabgabe an den Extremitätenenden an der gesamten Wärmeabgabe ist postovulatorisch auch niedriger, wenn die absoluten Beträge gleich sind. Die postovulatorische Wärmeabgabe liegt um 7.7 % höher als die praeovulatorische. Gleiche Werte an einzelnen Körperstellen bedeuten also schon eine "aktive" postovulatorische Einschränkung der Wärmeabgabe.

Zwischen Rumpf und Extremitätenenden finden sich Unterschiede in Amplitude, Phasenlage und den prae-/postovulatorischen Unterschieden zwischen den Gleichwerten. Im Vergleich zu den Extremitätenenden sind die Amplituden von Hauttemperatur, Wärmedurchgangszahl und Wärmeabgabe am Rumpf deutlich kleiner. Diese Größen folgen hier auch der Rektaltemperatur mit geringer Phasenwinkeldifferenz. An den Extremitätenenden beträgt diese Phasenwinkeldifferenz jedoch über 120° . Am Rumpf sind in der Regel die post-ovulatorischen Gleichwerte erhöht, an den Extremitätenenden eher die praeovulatorischen.

Auch unterschiedliche Änderungen der Wärmeübergangszahl lassen sich in diesem Sinne an Bauch und Hand nachweisen. Da während der Versuche gleiche Außenbedingungen herrschten, können Änderungen der Wärmeübergangsbedingungen nur von Seiten des Organismus hervorgerufen werden, z.B. durch Schwitzen. Bei hoher Wärmestromdichte kann auch eine höhere Wärmeübergangszahl entstehen, da die vermehrte Wärmeabgabe über ein höheres Temperaturgefälle die Turbulenz in Hautnähe vergrößert und dadurch die Dicke der Grenzschicht verkleinert. Auch durch Wasserverdunstung auf der Haut kann sich die Wärmeübergangszahl erhöhen, wenn durch den physikalischen Verdunstungsvorgang Turbulenz entsteht.

4.5. Überlegungen zur tagesperiodischen Organisation der Temperaturregulation

Aus den Kurven in Abb. 7 könnte die Hypothese aufgestellt werden, daß Wärmeabgabe und Kerntemperatur der Wärmebildung passiv mit bestimmten Phasenwinkeldifferenzen folgen, die von Organismus (z.B. durch Höhe der Wärmebildung, Körpergröße und -oberfläche) und Umgebungsbedingungen (wie z.B. Temperatur, Feuchtigkeit und Windgeschwindigkeit) bestimmt werden. Durch Änderung der Umgebungsbedingungen könnten demnach auch die Unterschiede in Amplitude und Phasenlage auftreten, wie sie für die physikalische Temperaturregulation (= Wärmeabgabe) bei verschiedenen Umgebungstemperaturen gefunden wurden.

Die tatsächliche Organisation der Wärmeabgabe widerspricht jedoch dieser Annahme. Die großen Amplitudenunterschiede, Phasenwinkeldifferenzen und die signifikant unterschiedlichen PPU an den verschiedenen Körperstellen weisen auf "aktive" Regulationsmechanismen besonders an den Extremitätenenden hin.

Auch die Wärmebildung setzt sich aus verschiedenen tagesperiodischen Funktionen zusammen: Sauerstoffverbrauch ($\dot{V}O_2$) und Kohlendioxidausscheidung ($\dot{V}CO_2$) zeigen einen deutlichen Tagesgang mit einer Phasenwinkeldifferenz von rund 35° oder 2.27 Stunden und relativen Amplituden, die sich fast um das zweifache unterscheiden:

Amp. $\dot{V}O_2 = 7.45 \%$; Amp. $\dot{V}CO_2 = 13.95 \%$.

Wenn Phasenwinkeldifferenz und Amplitudenunterschiede nicht allein durch das Fasten und den damit verbundenen ansteigenden Trend von $\dot{V}O_2$ hervorgerufen sind, dann muß es einen Tagesgang des RQ geben. Der RQ ist der Quotient aus $\dot{V}CO_2$ und $\dot{V}O_2$; von deren Phasenwinkeldifferenz und

Amplitudenunterschieden sind seine Amplitude und Phasenlage abhängig.

Während der ersten 12 Stunden des Versuches fällt der RQ zunächst kontinuierlich ab, erreicht abends nach etwa 24-Stunden Fasten ein Minimum und steigt danach insbesondere postovulatorisch bis zu den Morgenstunden wieder an. Dieser Verlauf und einige tierexperimentelle Untersuchungen (17) scheinen Hinweise dafür zu geben, daß es bei trendfreier Versuchsanordnung nach längerem Fasten tatsächlich einen Tagesgang des RQ gibt. Zu verschiedenen Tageszeiten müßten dann also Kohlenhydrate, Eiweiß und Fette in unterschiedlichem Ausmaß zur Wärmeproduktion herangezogen werden.

Der Abfall des RQ wird durch Umstellungen des Stoffwechsels beim Fasten verursacht. Wegen der fehlenden Nahrungszufuhr müssen zur Energieproduktion Glukoneogenese und schließlich in immer stärkerem Maße körpereigene Fettreserven herangezogen werden. Diese Umstellungen scheinen mit einer erhöhten Energieproduktion verbunden zu sein, was sich in den über die Dauer des Versuches hin ansteigenden Trends von Sauerstoffverbrauch und Wärmebildung zeigt. In Zusammenhang damit stehen wahrscheinlich auch die an Rumpf und ihm nahegelegenen Körperregionen ansteigenden Trends von Wärmestromdichte, Wärmedurchgangszahl und Hauttemperatur (Abb. 10). Was in diesen Gebieten dadurch zusätzlich an Wärme verloren geht, wird offensichtlich an den Extremitätenenden wieder eingespart; hier zeigen diese Größen abfallende Trends.

Ob Wärmebildung und Wärmeabgabe oder sogar Teilfunktionen von ihnen jeweils ein eigener Oszillator zugeordnet werden muß, ist bisher nicht entscheidbar. Eine genauere Untersuchung des Phänomens der internen Desynchronisation zwischen Aktivitätsperiode und Rektaltemperatur (12, 13, 25, 33, 34) könnte mehr Aufschluß über einen möglicherweise multioszillatorischen Aufbau der Temperaturregulation bringen. Die

auffallenden Änderungen in der Kurvenform der Rektaltemperatur bei intern desynchronisierten Versuchspersonen lassen eine Entkoppelung zwischen Wärmebildung und Wärmeabgabe vermuten. Aber erst der Nachweis eines Unterschiedes in der Frequenz bzw. der Periodendauer wäre der Beweis, daß beide von getrennten Oszillatoren gesteuert werden.

5. Zusammenfassung

Bei 8 gesunden jungen Frauen wurden die tagesperiodischen Verläufe verschiedener thermoregulatorischer Größen in Abhängigkeit vom Ovulationszyklus bei 28°C Umgebungstemperatur bestimmt.

5.1. Prae-/postovulatorische Unterschiede im 24-Stunden-Mittel

(1) Folgende Größen sind postovulatorisch erhöht:

Rektaltemperatur (R) um 0.31°C ($p < 0.001$).

Mittlere Hauttemperatur (HM) um 0.37°C ($p < 0.001$);
das entspricht einer Änderung des mittleren
Temperaturgefälles zwischen Haut und Umgebung
um 6.7 %.

Sauerstoffverbrauch ($\dot{V}O_2$) um 0.457 ml/kg min
oder 9.3 % ($p < 0.001$).

Kohlendioxidausscheidung ($\dot{V}CO_2$) um 0.34 ml/kg min
oder 9.1 % ($p < 0.005$); (der respiratorische Quotient
(RQ) zeigt keinen PPU).

Wärmebildung (WB) um 7.55 mcal/cm²min; das entspricht
178 kcal/24 Std. oder 9.3 % ($p < 0.001$).

Wärmeabgabe (WA) um 6.54 mcal/cm²min; das entspricht
155 kcal/24 Std. oder 7.7 % ($0.01 < p < 0.025$).

Mittlere Wärmedurchgangszahl (ZM) um 2.65 mcal/cm²min°C;
das entspricht einer Verbesserung des Wärmetransportes
durch die Körperschale um 9.8 %.

Aus diesen Befunden geht hervor, daß die Ursache der seit langem bekannten und durch Progesteron hervorgerufenen Erhöhung der Basaltemperatur in der postovulatorischen Phase eine Steigerung der Wärmebildung ist. In ihrem Gefolge steht die Erhöhung der mittleren Hauttemperatur, der Wärmeabgabe und der mittleren Wärmedurchgangszahl.

- (2) An verschiedenen Körperstellen zeigen Hauttemperatur (H), Wärmestromdichte (W), Wärmedurchgangszahl (Z) und Wärmeübergangszahl (U) unterschiedliches Verhalten in Abhängigkeit vom Ovulationszyklus:

Die Hauttemperaturen an den Extremitätenenden (Zehe, Fuß, Finger, Hand) haben keinen signifikanten PPU ($p \gg 0.2$). Postovulatorisch signifikant höhere Werte finden sich an Unter- und Oberschenkel, Brust, Stirn, Ober- und Unterarm ($p < 0.05$), andeutungsweise auch am Bauch ($0.1 < p < 0.2$). Bei steigender Kerntemperatur treten ebenfalls - wie mehrfach bei sinkender Raumtemperatur beschrieben - wachsende Temperaturunterschiede zwischen Extremitätenenden und Rumpf auf.

Die Wärmestromdichten sind postovulatorisch an Bauch ($p < 0.001$) und Oberarm ($0.01 < p < 0.025$) erhöht, andeutungsweise auch an der Stirn ($0.1 < p < 0.2$). Postovulatorisch erniedrigte Werte finden sich andeutungsweise an Hand ($0.05 < p < 0.1$) und Zehe ($0.1 < p < 0.2$). Die übrigen Körperstellen lassen keine Unterschiede erkennen.

Die Wärmedurchgangszahlen verhalten sich ähnlich: Postovulatorisch signifikant erhöht sind sie an Bauch ($0.005 < p < 0.01$) und Oberarm ($0.025 < p < 0.05$), erniedrigt an der Hand ($0.005 < p < 0.01$).

Die Wärmeübergangszahlen sind postovulatorisch ebenfalls am Bauch ($0.005 < p < 0.01$) erhöht, sowie an der Hand ($0.025 < p < 0.05$) erniedrigt.

5.2. Tagesgang, Schwingungsbreite bzw. Amplitude und Phasenlage

Viele Größen zeigen einen deutlichen Tagesgang wie Rektaltemperatur, $\dot{V}O_2$, $\dot{V}CO_2$, Wärmebildung, Wärmeabgabe und an verschiedenen Körperstellen Hauttemperatur, Wärmestromdichte und Wärmedurchgangszahl. Zwischen einigen Größen bestehen wichtige Zusammenhänge in Bezug auf Amplituden und Phasenlagen:

- (1) Die Grundschiwingung der Wärmeabgabe folgt der der Wärmebildung mit einer signifikanten Phasenwindeldifferenz von 1.23 Stunden ($0.025 < p < 0.05$); ihre Amplituden sind etwa gleich groß (3.5 bzw. 3.6 mcal/cm²min). Diese Phasenwindeldifferenz ist die Ursache für den Tagesgang der Körpertemperatur, an dem Wärmebildung und -abgabe in ungefähr gleichem Ausmaß beteiligt sind. Die Änderung der Rektaltemperatur in °C pro Zeiteinheit (DT) ließ sich mit folgender Gleichung berechnen:

$$DT = 0.0083 (WB_A - WA_A) + 0.0007,$$

wobei WB_A und WA_A jeweils die Abweichung der Wärmebildung und Wärmeabgabe vom 24-Stunden-Mittel in mcal/cm²min bedeuten.

- (2) Die Grundschiwingung von $\dot{V}O_2$ folgt der von $\dot{V}CO_2$ mit einer Phasenwindeldifferenz von 2.27 Stunden ($0.001 < p < 0.005$). In Prozenten des 24-Stunden-Mittels ausgedrückt ist die Schwingungsbreite von $\dot{V}CO_2$ mit 13.9 % etwa doppelt so groß wie die von $\dot{V}O_2$ mit 7.45 %. Nur bei gleicher Schwingungsbreite und Phasenlage wäre ein Tagesgang des RQ ausgeschlossen. Der Verlauf des RQ zeigt infolge der Fastensituation einen stark abfallenden Trend. Ob daneben ein Tagesgang existiert, ist nur zu entscheiden, wenn Amplitudenunterschiede und Phasenwindeldifferenz nicht allein

durch den "Fastentrend" entstehen. Das könnte in einer trendfreien Versuchsanordnung nachgewiesen werden.

- (3) An den Extremitätenenden besitzen die tagesperiodischen Verläufe von Hauttemperatur, Wärmestromdichte und Wärmedurchgangszahl große Amplituden und stehen zur Rektaltemperatur in großer Phasenwinkeldifferenz; am Rumpf hingegen sind Amplituden und Phasenwinkeldifferenz kleiner. An den Übergangsstellen zwischen Rumpf und Extremitätenenden lassen sich zum Teil keine tagesperiodischen Schwankungen nachweisen. Die Phasenwinkeldifferenz zwischen den Grundschrwingungen der Wärmestromdichte an Zehe und Bauch beträgt 105° . Die Grundschrwingung der Wärmestromdichte am Bauch folgt der der Rektaltemperatur dicht mit einer Phasenwinkeldifferenz von 27° , die der Zehe dagegen mit 132° . Die Schwingungsbreite der Grundschrwingung, ausgedrückt in Prozenten des 24-Stunden-Mittels, beträgt am Bauch 14 %, an der Zehe hingegen 95 %.

Die große Phasenwinkeldifferenz zwischen den Grundschrwingungen der Wärmestromdichte an Rumpf und Extremitätenenden und die große Variabilität der Wärmeabgabe an den Extremitätenenden sind für den abendlichen Abfall der Kerntemperatur verantwortlich. Zwischen Kerntemperatur und Wärmeabgabe an den Extremitätenenden besteht eine negative Korrelation.

- (4) Ausdruck dieser Beziehung sind auch prae-/postovulatorische Änderungen der Schwingungsbreiten bzw. Amplituden. Die Schwingungsbreite der Rektaltemperatur ist postovulatorisch um 0.11°C größer als praeovulatorisch. Zwischen den Amplituden der Grundschrwingungen beträgt der Unterschied 0.075°C ($0.01 < p < 0.02$). Dem entspricht eine postovulatorisch um $4.33 \text{ mcal/cm}^2\text{min}^{\circ}\text{C}$ größere Amplitude der Wärmedurchgangszahl an der Zehe

($0.025 < p < 0.05$). Ebenfalls postovulatorisch größere Amplituden besitzen die Wärmestromdichte am Bauch ($0.02 < p < 0.025$) und $\dot{V}CO_2$ ($0.025 < p < 0.05$).

- (5) Ein Einfluß des Ovulationszyklus auf die Phasenlage läßt sich nicht sicher nachweisen. Andeutungsweise findet er sich nur bei der Rektaltemperatur; hier liegt das postovulatorische Minimum 0.56 Stunden später als praeovulatorisch ($0.05 < p < 0.1$).

6. Literaturverzeichnis

- (1) Array, A.v., Meyer, H.: Grundumsatz in den mensuellen und in den Reproduktionsphasen.
Zbl. Gynäkol. 56, 184-200 (1932)
- (2) Aschoff, J.: Der Tagesgang der Körpertemperatur beim Menschen. Klin. Wochenschr. 33, 545-551 (1955)
- (3) Aschoff, J., Wever, R.: Die Wärmedurchgangszahl als Durchblutungsmaß am Menschen. Pflügers Arch. 264, 272-279 (1957)
- (4) Aschoff, J., Wever, R.: Kern und Schale im Wärmehaushalt des Menschen. Naturwissenschaften 45, 477-485 (1958)
- (5) Aschoff, J.: Hauttemperatur und Hautdurchblutung im Dienst der Temperaturregulation.
Klin. Wschr. 36, 193-202 (1958)
- (6) Aschoff, J.: Die Extremitäten als Effektoren der physikalischen Temperaturregulation.
Wien. med. Wschr. 108, 404-409 (1958)
- (7) Aschoff, J., Wever, R.: Modellversuche zum Gegenstrom-Wärmeaustausch in der Extremität.
Z. exper. Med. 130, 385-395 (1958)
- (8) Aschoff, J.: Exogenous and Endogenous Components in Circadian Rhythms. Cold Spring Harbor Symp. Quant. Biol. 25, 11 (1960)

- (9) Aschoff, J., Wever, R.: Spontanperiodik des Menschen bei Ausschluß aller Zeitgeber.
Naturwiss. 49, 337 (1962)
- (10) Aschoff, J.: Survival Value of Diurnal Rhythms.
Symp. Zool. Soc. London 13, 79 (1964)
- (11) Aschoff, J.: Die minimale Wärmedurchgangszahl des Menschen am Tage und in der Nacht.
Pflüg. Arch. ges. Physiol. 295, 184-196 (1967)
- (12) Aschoff, J., Gerecke, U., Wever, R.: Desynchronization of Human Circadian Rhythms.
Jap. J. Physiol. 17, 450 (1967)
- (13) Aschoff, J.: Circadian Rhythm of Activity and of Body Temperature. In: Physiological and behavioral Temperature Regulation, Chapter 60.
(Ed. J.D. Hardy, A.P. Gagge, J.A.J. Stolwijk)
Charles C. Thomas Publ. Springfield, Illinois, USA (1970)
- (14) Aschoff, J., Pohl, H.: Rhythmic variations in energy metabolism. Federation Proceedings Vol. 29,
No. 4, 1541-1552, July-August (1970)
- (15) Aschoff, J., Heise, A.: Thermal Conductance in Man: Its Dependence on Time of Day and on Ambient Temperature. Advances of climatic physiology.
Tokyo, Japan, 334-348 (1971)
- (16) Aschoff, J.: Temperaturregulation. In: Gauer, Kramer, Jung: Physiologie des Menschen, Band 2,
Urban u. Schwarzenberg (1971)

- (17) Biebach, H.: Max-Planck-Institut für Verhaltens-
physiologie, Erling-Andechs,
unveröffentlichte Daten.
- (18) Collett, M.E.: Basal metabolism at the menopause.
J. Appl. Physiol. 1, 629-636 (1948/49)
- (19) Conklin, Cl.J., McClendon, J.F.: The basal metabolic
rate in relation to the menstrual cycle.
Arch. int. Med. 45, 125-135 (1930)
- (20) Consolazio et al.: Physiological Measurements of Metabolic
Functions in Man. McGraw-Hill, New York,
S. 315 (1963)
- (21) Davis, M.E., Fugo, N.W.: The cause of physiologic basal
temperature changes in women.
J. clin. Endocrin. 8, 550 (1948)
- (22) Documenta Geigy: Wissenschaftliche Tabellen, 7. Auflage,
S. 535 (1968)
- (23) Döring, G.K.: Der Temperaturzyklus der Frau. Eine
Übersicht über die Grundlagen und die
Anwendungsmöglichkeiten der Temperaturmessung
als Methode der Zyklusanalyse.
Ärztliche Forschung, VI. Jhrg. Heft 1
(S. 1/13-1/28) 10. Jan. 1952
- (24) Freeman, M.E. et al.: Thermogenic Action of Progesterone
in the Rat. Endocrinology 86, 717-710 (1970)
- (25) Ghata, J., Halberg, F., Reinberg, A., Siffre, M.:
Rythmes circadiens désynchronisés du cycle
social (17-hydroxycorticostéroïdes,
température rectale, veille-sommeil) chez
deux sujets adultes sains. Ann.
d'Endocrinologie 30, 245 (1969)

- (26) Halberg, F.: Physiologic 24-hour periodicity: General and procedural considerations with reference to the adrenal cycle. Z. Vitamin-, Hormon- und Fermentforschung. 10, 225 (1960)
- (27) Heise, A.: Der Einfluß der Umgebungstemperatur auf verschiedene temperaturregulatorische Größen beim Menschen mit besonderer Berücksichtigung der Tagesperiodik.
Diss. München (1969)
- (28) Horvath, S.M., Menduke, H., Piersol, G.M.: Oral and rectal temperatures of man. J. Amer. med. Ass. 144, 1562-1564 (1950)
- (29) Pfleiderer, H., Büttner, K.: Die physiologischen und physikalischen Grundlagen der Hautthermometrie, Leipzig 1935
- (30) Pittendrigh, C.S.: Circadian rhythms and the circadian organization of living systems. Cold Spring Harbor Symp. Quant. Biol. 25, 159 (1960)
- (31) Seward, G.H.: The female sexual rhythm.
Psychol. Bull. 31, 153-192 (1934)
- (32) Wagner, K.W.: Einführung in die Lehre von den Schwingungen und Wellen. Dieterich'sche Verlagsbuchhandlung Oktober 1947, Wiesbaden
- (33) Wever, R.: Über die Beeinflussung der circadianen Periodik des Menschen durch schwache elektromagnetische Felder.
Z. vergl. Physiol. 56, 111 (1967)
- (34) Wever, R.: Autonome circadiane Periodik des Menschen unter dem Einfluß verschiedener Beleuchtungsbedingungen. Pflüg. Arch. 306, 71 (1969)

7. Lebenslauf

Am 23. Februar 1942 wurde ich als Sohn des Gynäkologen Dr.med. Otto Schmidt und seiner Ehefrau, der Schauspielerin Charlotte Ulbrich, in Stendal (Altmark) geboren. Im Oktober des Jahres 1944 verstarb mein Vater. Meine Mutter heiratete im Frühjahr 1948 den Regisseur Peter Podehl.

Von 1948 bis 1950 besuchte ich die Grundschule in Weimar, von 1951 bis 1955 die in Potsdam-Babelsberg. Im November 1955 übersiedelte die Familie in die Bundesrepublik nach München. Hier ging ich auf das Deutsche Gymnasium, an dem ich 1962 das Abitur ablegte.

An der Ludwig-Maximilians-Universität München begann ich im Herbst 1962 das Studium der Medizin. Am 12.2.1969 bestand ich dort das medizinische Staatsexamen. Als Medizinalassistent arbeitete ich von März 1969 bis April 1970 in der chirurgischen Abteilung des Städtischen Krankenhauses München-Harlaching, am Physiologischen Institut der Universität München sowie in der 1. Medizinischen Klinik der Universität München. Am 31. März 1970 erhielt ich die Approbation als Arzt.

Von April 1970 bis September 1971 arbeitete ich als Stipendiat der Max-Planck-Gesellschaft am Max-Planck-Institut für Verhaltensphysiologie in Seewiesen und Erling-Andechs (Abt. Prof. J. Aschoff). Seit Oktober 1971 bin ich als wissenschaftlicher Assistent am Zentrum für Innere Medizin und Kinderheilkunde der Universität Ulm (Abt. Prof. Th. von Uexküll) tätig.

Thomas H. Schmidt

